



FRONTERA BIOTECNOLÓGICA

Biosurfactantes:
Una herramienta clave para la biotecnología sostenible



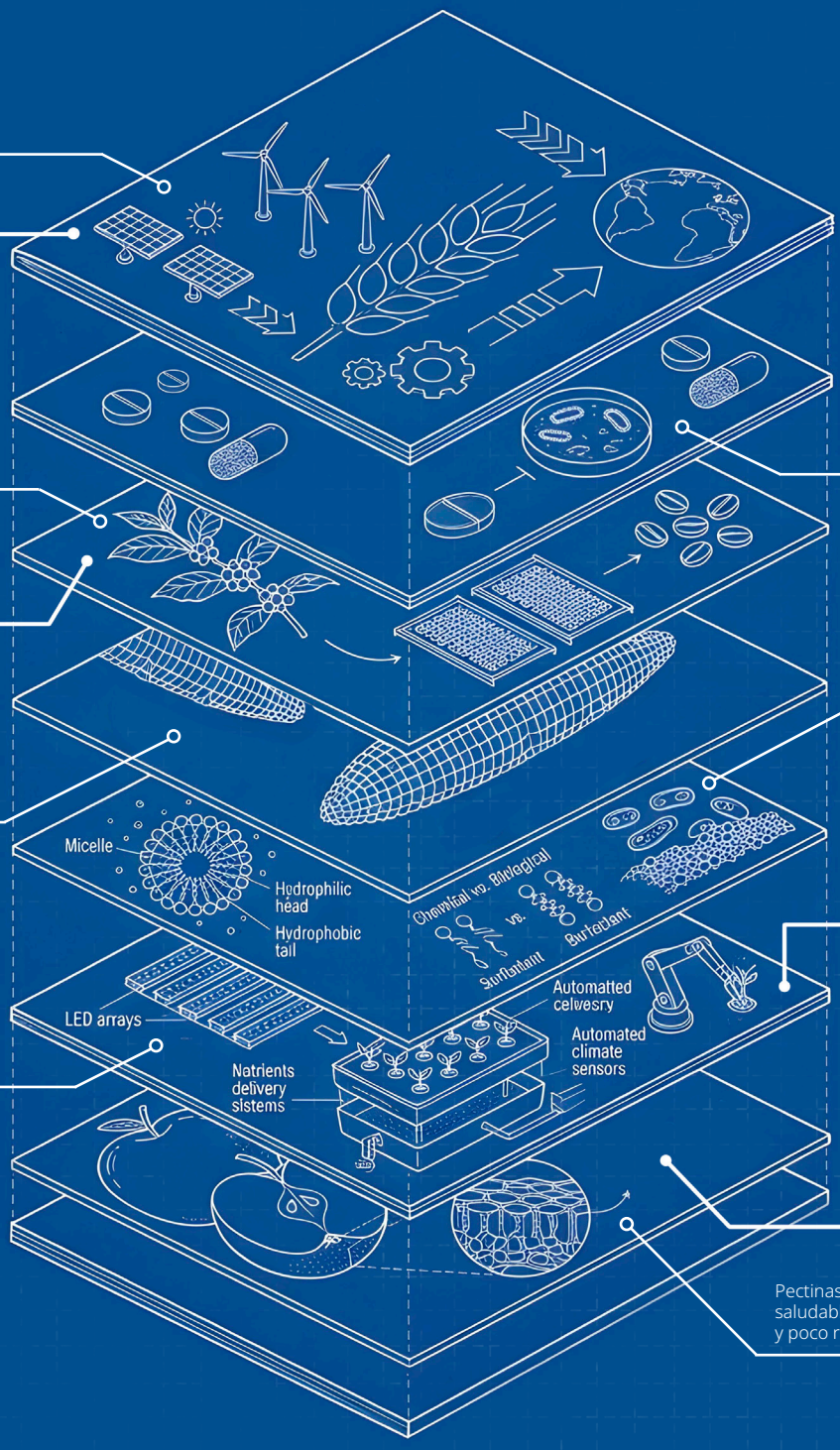
Cafés naturales: Tradición, ciencia y sostenibilidad



Maíz ajo: el "Neandertal" de los maíces nativos de México

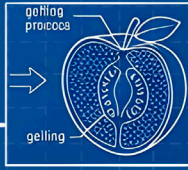


La tecnología para el cultivo de plantas:
Sistemas de inmersión temporal



Antibióticos, la cronología de un gran descubrimiento transformado en amenaza

Micoproteínas ¿Posible Solución Frente al Cambio Climático y la Crisis Alimentaria?



Pectinas: macromoléculas saludables, ampliamente disponibles y poco reconocidas

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Biotechnología Genómica

Esta línea de investigación se enfoca en el estudio del potencial biotecnológico del genoma de virus, bacterias, hongos y plantas mediante el uso de tecnologías "Omicas" y biotecnología moderna (ingeniería genética, CRISPR-Cas), para impactar en la resolución de problemáticas de interés global como la mitigación de los efectos del cambio climático, la contaminación ambiental y la salud.

Biotechnología Ambiental

Tiene como objeto el desarrollo, uso y regulación de sistemas biológicos para la remediación de ambientes contaminados (del suelo, aire y agua) y para procesos amigables con el medioambiente (tecnologías verdes y desarrollo sustentable).

Algunos proyectos se enfocan en:

- Aprovechamiento de residuos agroindustriales y pecuarios.
- Aplicación de microorganismos y sistemas enzimáticos para remoción de contaminantes.
- Producción de energías renovables.

Productos Naturales

Se enfoca en el aprovechamiento de metabolitos de origen natural, que sirvan como punto de partida para el desarrollo de alternativas terapéuticas.

Algunos de los proyectos son:

- Evaluación de efecto citotóxico para el desarrollo de antitumorales.
- Evaluación de efecto antihiper glucémico in vivo.
- Identificación de inhibidores enzimáticos (a-glucosidasa, aldosa reductasa, lipasa).



Centro de
Investigación en
Biotecnología
Aplicada
IPN-TLAXCALA

Nanobiotechnología

Comprende el uso y aplicación de elementos nanoestructurados, orgánicos e inorgánicos, para el desarrollo de:

- Biosensores y marcadores biológicos.
- Nano-encapsulados de uso alimentario.
- Nanotransportadores de fármacos y otras aplicaciones.

Biotechnología Agroalimentaria

Realiza investigación de frontera para contribuir en las demandas de cadena alimentaria en forma integral.

Algunos de los proyectos están enfocados a:

- Incrementar rendimientos y valor nutricional de producción agrícola.
- Prolongar la vida útil de los alimentos.
- Aislar o concentrar principios bioactivos.
- Desarrollar nuevos productos.

Bioprocesos

Tiene la misión de establecer el desarrollo y establecimiento de los procesos de producción optimizando las etapas.

Algunos proyectos son:

- Producción de enzimas, colorantes, compuestos bioactivos.
- Biocatálisis.
- Transformación de biomasa vegetal en biocombustibles.
- Producción de biológicos para aplicación en salud humana y animal.
- Tecnología de biopreservación.

Directorio Institucional



Arturo Reyes Sandoval
Director General

Ismael Jaidar Monter
Secretario General

María Isabel Rojas Ruíz
Secretaria Académico

Martha Leticia Vázquez González
Secretaria de Investigación y Posgrado

Yessica Gasca Castillo
Secretaria de Innovación e Integración Social

Marco Antonio Sosa Palacios
Secretario de Servicios Educativos

Ana María Arrona González
Secretaria de Administración

José Alejandro Camacho Sánchez
Secretario Ejecutivo del Patronato de Obras e Instalaciones

Marx Yazalde Ortiz Correa
Abogado General

Modesto Cárdenas García
Presidente del Decanato

Marco Antonio Ramírez Urbina
Coordinador de Imagen Institucional

Diana Verónica Cortés Espinosa
Directora del CIBA-IPN, Tlaxcala

María del Carmen Cruz López
Subdirectora Académica del CIBA-IPN, Tlaxcala

Erik Ocaranza Sánchez
Subdirector de Vinculación del CIBA-IPN, Tlaxcala

Víctor Eric López y López
Editor en Jefe

Miriam Martínez Méndez
Coordinadora de Enlace y Gestión Técnica

Jaime Rivera Contreras
Diseño y Diagramación Frontera Biotecnológica

Ismael Sánchez González
Unidad de Tecnología Educativa y Campus Virtual

Gonzalo Pérez Araiza
Soporte Técnico

Lilia Espindola Rivera
Coordinadora Administrativa

Contenido

6

Mensaje Editorial

8

**Micoproteínas
¿Posible Solución
Frente al Cambio
Climático y la Crisis
Alimentaria?**

18

**Maíz ajo: el
"Neandertal"
de los maíces
nativos de
México**

28

**Antibióticos,
la cronología
de un gran
descubrimiento
transformado en
amenaza**

40

**Cafés naturales:
Tradición,
ciencia y
sostenibilidad**

50

**La tecnología
para el cultivo de
plantas:
Sistemas de
inmersión
temporal**

60

**Biosurfactantes:
Una herramienta
clave para la
biotecnología
sostenible**

70

**Pectinas:
macromoléculas
saludables,
ampliamente
disponibles
y poco
reconocidas**

ipn.mx

revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx
rfronterab@ipn.mx

FRONTERA BIOTECNOLÓGICA, año 14, número 33, enero - abril 2026, es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto Politécnico Nacional a través del Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, México. Conmutador IPN:57296000, Ext. 87816. <http://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/>, Editor responsable: Dr. Víctor Eric López y López. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2015-120313501700-203, ISSN: 2448-8461, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Dr. Víctor Eric López y López., Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, fecha de última modificación, 13 de abril de 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Politécnico Nacional.



Mensaje Editorial

abril 2026

Apreciados lectores:

Hemos llegado al número 33 de *Frontera Biotecnológica* en una temporada en la que hemos sido testigos de eventos trascendentes en la historia universal. Por un lado, un conflicto bélico que ha traído muerte y tristeza y que, a pesar de llevarse a cabo a miles de kilómetros de distancia, no solo afecta lo económico, sino también el ánimo; por otro, los avances científicos continúan despertando asombro y recordándonos nuestra capacidad de imaginar y construir futuros distintos, ya que fuimos partícipes de la emoción que significó el regreso a la Luna, aunque fue un viaje de ida y vuelta sin alunizaje, nos quedamos maravillados como niños desde el despegue hasta su amerizaje del Artemis II. ¿No es este contraste una invitación a reflexionar sobre el papel de la ciencia en nuestra vida cotidiana?

En este contexto, los trabajos que integran este número nos muestran distintas formas en que la biotecnología responde a los desafíos actuales. ¿Sabían que, por medio de la biotecnología, los hongos pueden emerger como una fuente proteica innovadora ante

los retos ambientales? En este número conoceremos cómo las micoproteínas pueden convertirse en una alternativa a la proteína animal, además de aportar fibra y micronutrientes con beneficios para la salud.

Y si hablamos de diversidad, no solo biológica sino también cultural, así como antes del hombre (*homo sapiens*) hubo neandertales, en el caso del maíz también, conoceremos una especie conocida como “maíz ajo” cuyo valor no radica en su productividad o en su uso culinario, una variedad poco común que se distingue por una morfología singular y una historia estrechamente ligada a prácticas rituales y cosmovisiones indígenas, ya que como dijera por ahí... “No solo de masa vive el hombre” y como todo mexicano debemos de conocer y entender. Ahora bien, ¿qué ocurre cuando el uso de la ciencia pierde su equilibrio? El uso de los antibióticos nos ha evitado innumerables calamidades, sí, pero su uso excesivo, la mala gestión y las prácticas inadecuadas han provocado la propagación acelerada de bacterias resistentes y multiresistentes. Y si no cambiamos nuestra mentalidad y conciencia, ¿podríamos enfrentar la pérdida de millones de vidas en los próximos años? La respuesta nos invita a actuar: no a la automedicación.

Pasando a un tema que seguramente despierta el interés de muchos... ¿Gustan un café? El café natural, producido mediante métodos ancestrales, hoy adquiere relevancia científica por su impacto sensorial y su contribución a la sostenibilidad ambiental. ¿Es posible equilibrar tradición e innovación en los procesos productivos? En este número exploraremos cómo lograrlo.

Y en esta misma línea de innovación, ¿sabían que es posible multiplicar plantas mediante tecnologías de micropropagación con sistemas de inmersión? Estas herramientas permiten no solo la producción de cultivos de interés, sino también la conservación de especies y la reforestación de ecosistemas. Interesante, ¿no creen? Por otro lado, existen compuestos que, aunque muchas veces pasan desapercibidos, están presentes en numerosos productos de nuestra vida cotidiana. ¿Han escuchado hablar de los biosurfactantes? Estos compuestos anfipáticos, producidos por microorganismos, tienen aplicaciones en industrias como la alimentaria, farmacéutica, cosmética e incluso la petrolera, y representan alternativas más sostenibles frente a compuestos sintéticos.

Finalmente, ¿sabían que existen moléculas de origen vegetal con múltiples beneficios para la salud? Las pectinas, conocidas desde hace más de 200 años, presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, prebióticas y potencialmente antitumorales. Además, son ampliamente utilizadas en la industria alimentaria por su capacidad de estabilizar y aportar textura. ¿No nos recuerda esto aquella frase atribuida a Hipócrates: “*Que la comida sea tu alimento y el alimento tu medicina*”?

A pesar de la incertidumbre a nivel mundial, que este número sirva como recordatorio de que no vivimos de manera aislada. Por grande que sea nuestro planeta, cualquier efecto en él repercute en todos los seres vivos, incluidos los microorganismos que tanto protagonismo tienen en nuestra revista. Que vengan tiempos mejores es lo que deseamos, y mientras tanto, continuaremos trabajando por nuestro querido México, desde la trinchera de cada uno, con compromiso, responsabilidad y humanidad. Esto nos lleva, como siempre, a compartir con ustedes el espíritu de nuestro querido lema politécnico:

“La Técnica al Servicio de la Patria”

Dr. Víctor Eric López y López
Editor en Jefe



Micoproteínas

¿Posible Solución Frente al Cambio Climático y la Crisis Alimentaria?

Juárez-Martínez Jorge Arturo, V. Eric López Y López, Luna-Suarez Silvia

Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada Instituto Politécnico Nacional, Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, México.

Correo electrónico: silvials2004@yahoo.com.mx



RESUMEN

El crecimiento de la biotecnología ha impulsado el uso de microorganismos en diversas aplicaciones, destacando el papel crucial de los hongos en múltiples sectores. En este contexto, la creciente demanda mundial de alimentos, el impacto del cambio climático y la necesidad de alternativas sostenibles han llevado a la exploración de fuentes proteicas innovadoras. Los hongos emergen como una solución viable debido a su alto valor nutricional, rápida producción y adaptabilidad ambiental. La micoproteína, obtenida mediante fermentación de residuos agroindustriales, es una alternativa prometedora a la proteína animal, con un perfil nutricional equilibrado y un impacto ambiental reducido. Su producción industrial emplea principalmente fermentación en estado sólido y sumergida, permitiendo una producción eficiente y de bajo costo. Además, la micoproteína posee una composición rica en proteínas, fibra y micronutrientes esenciales, con beneficios demostrados para la salud, como la regulación de la glucosa e insulina, la mejora del perfil lipídico y el apoyo al desarrollo muscular. A pesar de sus ventajas, persisten desafíos en la optimización de los procesos de producción y su aceptación en el mercado. El avance en la biotecnología y la innovación en la producción de micoproteínas prometen consolidarlas como una solución clave para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad global. En el presente trabajo se da una revisión general sobre la producción, composición y tendencias de la micoproteína.

Palabras clave: micoproteína, homólogos de carne, biotecnología, hongos, aminoácidos, cambio climático.



ABSTRACT

The expansion of biotechnology has driven the utilization of microorganisms in various industrial applications, highlighting the crucial role of fungi in multiple sectors. In this context, the increasing global demand for food, the impact of climate change, and the need for sustainable alternatives have led to the exploration of innovative protein sources. Filamentous fungi emerge as a viable solution due to their high nutritional value, rapid growth, and environmental adaptability. Mycoprotein, obtained through the fermentation of agro-industrial residues, is a promising alternative to animal protein, offering a balanced nutritional profile and reduced environmental impact. Its industrial production mainly employs solid-state and submerged fermentation, enabling efficient and cost-effective large-scale production. Moreover, mycoprotein is rich in protein, fiber, and essential micronutrients, with proven health benefits such as glucose and insulin regulation, improved lipid profiles, and support for muscle development. Despite its advantages, challenges remain in optimizing production processes and market acceptance. However, advancements in biotechnology and innovations in mycoprotein production are poised to establish it as a key solution for global food security and sustainability. This paper provides a general review of mycoprotein production, composition, and trends.

INTRODUCCIÓN

Las dos últimas décadas han sido testigo de un enorme aumento en el uso de microorganismos para diversos procesos biotecnológicos e incluso ha demostrado ser económicamente viable y, como resultado, actualmente el sector de la biotecnología se considera un negocio de miles de millones de dólares a nivel mundial (Elkhateeb, 2022). Los hongos juegan un papel importante en la vida humana, como en la agricultura, la industria alimentaria, la medicina, los textiles, la biorremediación, el ciclo natural del carbono, como biofertilizante y de otras maneras. Los hongos son omnipresentes en la tierra y representan componentes esenciales de muchos ecosistemas, donde están involucrados en diversos procesos vitales. Históricamente, los productos naturales fúngicos han desempeñado un papel importante en el descubrimiento de alternativas a diferentes problemas, por ejemplo, el descubrimiento de la penicilina. (Ahmad et al., 2022).

En las últimas dos décadas se ha producido un aumento de la demanda mundial de carne

debido al rápido crecimiento demográfico y económico (Whitnall & Pitts, 2019) (FAO, 2023). De acuerdo con las Naciones Unidas, se espera que la población mundial siga creciendo en los próximos 50 o 60 años, alcanzando un pico de alrededor de 10.300 millones de personas a mediados de la década de 2080, frente a los 8.200 millones de 2024 (ONU, 2024). El cambio climático afectará a la producción de alimentos, la seguridad alimentaria y la nutrición. El aumento en la variabilidad de las precipitaciones y la frecuencia de sequías e inundaciones provocará seguramente una caída generalizada en el rendimiento de los cultivos (ONU, 2024). El cambio climático también afectará al medio acuático, por ejemplo, por cambios en la temperatura de la superficie del mar, la circulación oceánica, las olas y los sistemas de tormenta, la concentración salina y de oxígeno y la acidificación, lo que afectará también a la industria pesquera. El impacto del cambio climático en la seguridad alimentaria mundial se notará no solo en el suministro de alimentos, sino también en la calidad, el acceso y la utilización de los mismos

y en la estabilidad de la seguridad alimentaria (ONUAA, 2017). Por estas razones mencionadas, es fundamental buscar y desarrollar alternativas que puedan mitigar el impacto ambiental, la escasez futura de producción de alimentos y que cumplan con los requerimientos necesarios para tener una buena nutrición.

Los hongos representan potentes herramientas biotecnológicas para la producción de sustancias naturales bioactivas, que podrían prolongar la vida saludable de la humanidad (Elkhateeb, 2021) ya que estudios demuestran que son fuentes potenciales como sustituto de carne debido a su alto valor biológico, rápido desarrollo, su perfil nutricional saludable, su capacidad de producción a bajo costo, sus beneficios ambientales y su resistencia a las limitaciones del ambiente, como inundaciones o sequías hacen destacar su gran importancia y beneficio (Derbyshire & Delange, 2021). Cabe resaltar que las emisiones de CO₂ de la micoproteína van de 5.55 a 6.15 kg de CO₂ por kg de producto fúngico, en comparación a las emisiones de carne de

res que son alrededor de 27 kg de CO₂ por kg de carne (Finnigan et al., 2017). Por otro lado la expansión del uso de la tierra para la producción de alimentos afecta negativamente la capacidad de desarrollo sostenible del planeta, la micoproteína es una alternativa potencial a los productos de origen animal para reducir el uso de la tierra, ya que para producir una tonelada de micoproteína se necesita un área entre 1500 a 4200 m² esto debido a diferencias metodológicas en los procesos de operación, a diferencia de los 5000 a 8000 m² que se necesitan para una tonelada de carne de pollo (Hashempour-Baltork et al., 2020). Los sistemas de cultivo fúngico permiten una producción controlada e independiente de las condiciones climáticas. La fermentación fúngica es hasta 10 veces más eficiente en conversión de biomasa y 100 veces más rápida, por ejemplo, el tiempo de producción de micoproteína es de 3 a 10 días, mientras que para ganadería bovina es de 18 a 24 meses, la conversión de sustrato en proteínas para micoproteína es de 0.45 a 0.6 g/g, mientras que para la ganadería bovina es de 0.05 a 0.15 g/g (FAO, 2013; Ritala et al., 2017). Además, la huella hídrica de la micoproteína es de aproximadamente de 4L/Kg, mientras que la de carne de pollo es de aproximadamente 500L/Kg (Finnigan et al., 2017) lo que nos da una visión más amplia de las ventajas ambientales que tiene la micoproteína.

2

PRODUCCIÓN

La fuente de sustratos para el cultivo de biomasa fúngica es muy importante. Dado que la producción se hace a nivel industrial, su coste es un factor crucial. Para llevar a cabo la producción a costos más baratos, los residuos agroindustriales (con pretratamientos adecuados) son la mejor manera de cultivar la biomasa fúngica (Singh y Gaur, 2021).

La micoproteína se produce mediante la conversión de residuos agroindustriales usando los mismos procesos de la fermentación (Majumder et al., 2023), algunos de los materiales agroindustriales utilizados son los residuos de arroz, manzana, papaya y plátano (Singh y Gaur, 2021).

De acuerdo con (Majumder et al., 2023) existen tres procesos de fermentación para la produc-

ción masiva de micoproteínas: fermentación en estado sólido (SSF), fermentación sumergida (SmF) y fermentación en cultivo de superficie, siendo la SSF y la SmF los utilizados para producción a escala industrial debido a los altos costos que representa la fermentación en estado sólido.

La producción de micoproteína en SmF como se observa en la Figura 1, comienza con el cultivo de la cepa de interés utilizando diferentes hongos, como inferiores (*Fusarium venenatum*, *Neurospora intermedia*, *Rhizopus oryzae*) y superiores (*Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma lucidum*) utilizados para la producción de micoproteína. Por parte de los hongos inferiores existen pocos hongos utilizados para la producción de micoproteínas, debido a que algunos producen sustancias tóxicas llamadas micotoxinas, y estas son eliminadas bajo ciertos

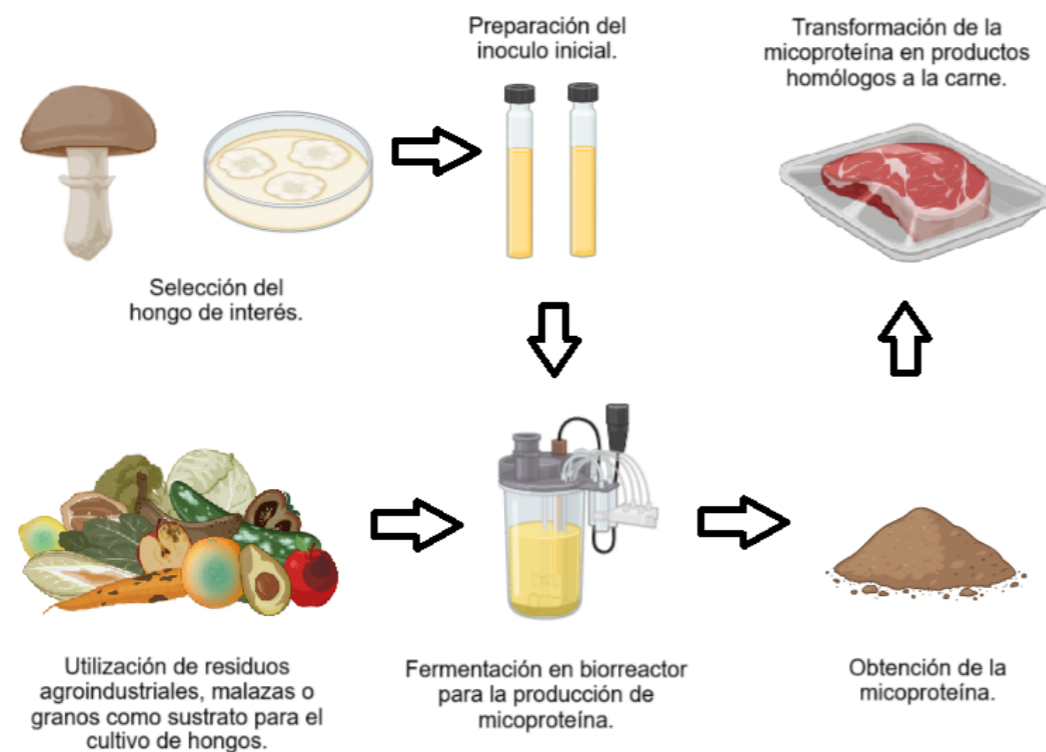


Figura 1. Proceso general para la producción de micoproteína (creado en Biorender.com)

tratamientos específicos, son utilizados principalmente por su velocidad de crecimiento, adaptación a diferentes medios de crecimiento y al tipo de micelio que producen, característica que se aprovecha para el desarrollo de formación de hebras o haces filamentosos similares a la carne (Pobiega et al., 2024). Dentro de los hongos superiores se utiliza para consumo un grupo en específico, los basidiomicetos, son una clase diversa de hongos superiores (filo *Basidiomycota*) que incluye la mayoría de las especies formadoras de hongos. Se distinguen por su capacidad para descomponer la lignina y otros polímeros complejos, convirtiendo así los residuos agrícolas ricos en lignina en biomasa fúngica enriquecida en proteínas (Rubia et al., 2025).

A nivel mundial, se reconocen aproximadamente 2000 especies de hongos como comestibles, y a un subconjunto de estas se le ha otorgado el estatus de Generalmente Reconocido como Seguro (GRAS) para su uso en alimentos (Łysakowska & Sobota, 2023).

Para la producción de micoproteínas, se prepara un inóculo que servirá para la fermentación, para ello se utilizan residuos ricos en azúcares y se añade una fuente de nitrógeno para un crecimiento óptimo, se inocula el biorreactor, llevando a cabo la fermentación bajo condiciones controladas de

las variables temperatura, pH, concentración de nutrientes y oxígeno (Giavasis et al., 2019). Pasado el tiempo de fermentación se somete a un calentamiento entre 55 a 75°C por un tiempo entre 30 y 60 minutos, para posteriormente separar la biomasa por métodos físicos, los sólidos resultantes son concentrados y llevados a secar a 60°C hasta obtener una humedad aproximada del 10%. La biomasa resultante se almacena a 4°C y se somete a congelamiento a -10°C mínimo 30 minutos antes de manipular la biomasa. Después del congelamiento, se descongela la biomasa para someterla a extrusión (Finnigan et al., 2017) para la obtención de texturas fibrilares, la micoproteína suele someterse a extrusión de alta humedad utilizando extrusores de doble tornillo, donde estudios recientes han empleado temperaturas entre 120–160 °C, humedades del 20–40% y velocidades de 200–300 rpm para obtener estructuras similares a la carne (Sui et al., 2024) para tener un mayor reacomodo de las hifas; además de agregar diferentes agentes que promuevan una consistencia y apariencia a la carne o a los productos cárnicos (Finnigan et al., 2017), como se muestra en la figura 2 donde se compara las estructuras de hebra de un corte de bistec de cerdo y una muestra de micoproteína donde se observa que preserva la estructura de las hifas creando haces filamentosos, similar a las proteínas fibrilares de la carne (Colosimo et al., 2020).

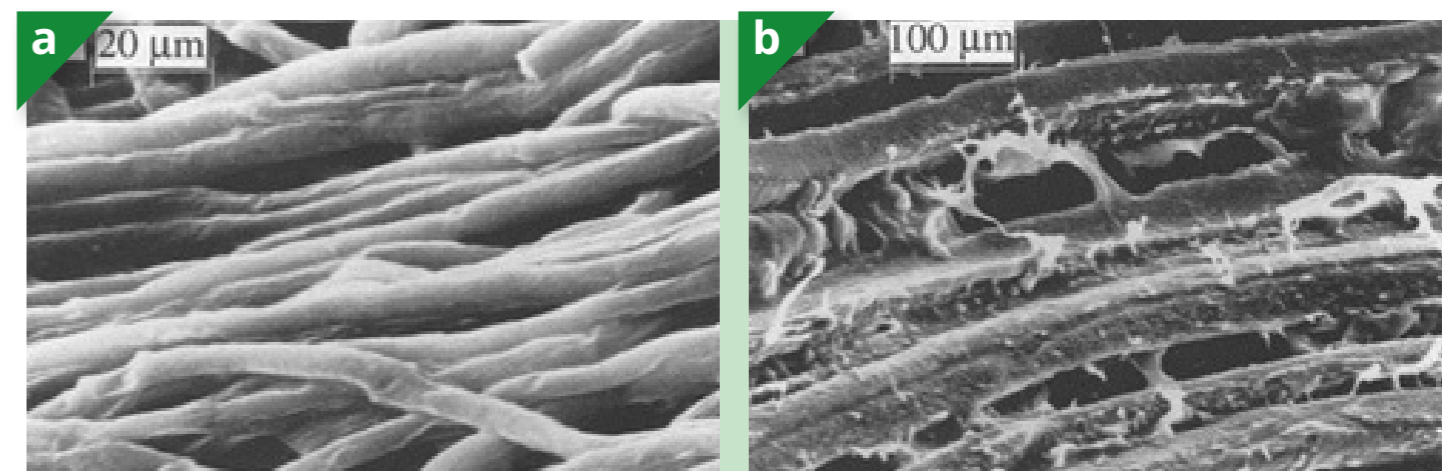


Figura 2. Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) que muestran (a) micoproteína preparada a partir de *Fusarium graminearum* y (b) tejido muscular de bistec de cerdo. Ambas imágenes fueron adquiridas a un aumento aproximado de 2,000x, lo que permite una comparación directa de la microestructura fibrosa del micelio fúngico y del músculo animal (Trinci, 1992)

3 COMPOSICIÓN

La micoproteína es una buena fuente de proteínas y de fibra. La composición de la fibra dietética es aproximadamente un tercio de quitina y dos tercios de β -1, 3 y 1, 6 glucanos. El contenido de grasa del material recolectado suele ser del 2 al 3.5 % y la composición de los ácidos grasos es mucho más parecida a la grasa vegetal que a la animal (relación poliinsaturada/saturada 3.5:1, tri y diglicéridos 65 %, esteroides lipídicos totales y lípidos no saponificados 5 % y fosfolípidos 30 %). La micoproteína es rica también en vitaminas, especialmente vitaminas del grupo B, minerales como hierro, zinc, sodio, selenio, manganeso, calcio, fósforo, carbohidratos, aminoácidos esenciales y menos contenido de grasa. Además, la micoproteína mejora el perfil lipídico y desempeña un papel clave en la síntesis de

Componentes	Micoproteína	Leche	Huevo	Res	Puerco	Pollo	Soya	Trigo
Proteína, g	11.25	3.40	12.56	20.20	21.80	24.00	14.00	13.70
EAA, g								
Histidina	0.35	0.09	0.30	0.66	0.89	0.72	0.60	2.30
Isoleucina	0.52	0.20	0.68	0.87	1.06	1.22	1.10	3.40
Leucina	0.86	0.32	1.10	1.53	1.83	1.82	1.80	6.80
Lisina	0.83	0.26	0.90	1.60	2.05	1.39	1.40	2.50
Metionina	0.21	0.08	0.39	0.50	0.60	0.68	0.30	1.80
Fenilalanina	0.49	0.16	0.66	0.76	0.91	1.17	1.10	4.40
Triptófano	0.16	0.05	0.16	0.22	1.03	0.19	0.30	1.00
Treonina	0.55	0.15	0.60	0.84	0.28	0.71	0.80	2.80
Valina	0.62	0.22	0.76	0.94	1.24	1.21	1.10	4.50
Fibra, g								
Fibra total	6.00	Traza	Traza	Traza	Traza	Traza	6.10	11.20
Grasas, g								
Grasas totales	2.90	1.70	9.51	4.30	4.00	1.10	7.30	2.50
Ácidos grasos saturados	0.60	1.10	3.13	1.70	1.40	0.30	0.90	0.74
Micronutrientes								
Hierro, mg	0.50	0.02	1.70	3.50	0.80	0.40	3.00	3.60
Zinc, mg	9.00	0.40	1.29	0.40	2.10	0.70	0.90	2.80
Sodio, mg	5.00	43.00	142.00	43.00	63.00	60.00	1.00	2.00
Selenio, mg	20.00	1.00	11.00	1.00	13.00	12.00	5.00	70.70
Vitamina B12, μ g	Traza	0.40	0.89	0.40	Traza	Traza	Traza	Traza
Carbohidratos totales, g	3.00	4.70	Traza	0.06	Traza	Traza	5.10	71.10
Azúcar, g	0.50	4.60	Traza	Traza	Traza	Traza	1.64	5.00
Energía total, Kcal	85.00	46.00	151.00	172.00	123.00	106.00	141.00	339.00

Tabla 1. Composición de micoproteína en comparación con otras fuentes de proteína (Ahmad et al., 2022)

proteínas musculares en individuos jóvenes ya que contiene aminoácidos esenciales, que no los puede sintetizar el organismo, necesarios para la síntesis de proteínas, participan como moléculas bioactivas que desempeñan funciones importantes en la nutrición y metabolismo (Nie et al., 2018). En la Tabla 1 se muestra la composición de aminoácidos de micoproteína y se compara con otras fuentes alimenticias. En la misma tabla se observa que las micoproteínas representan una buena fuente de nutrientes, ya que en aminoáci-

dos esenciales tiene valores superiores comparado con la leche, contiene mayor cantidad de fibra dietética que la mayoría de los alimentos en la tabla, su contenido de grasas es menor comparado con otras fuentes de proteína, tiene mayor cantidad de micronutrientes y menor cantidad de carbohidratos en comparación a las fuentes vegetales y tiene menor contenido calórico.

4 DESAFÍOS Y TENDENCIAS FUTURAS

Existen crecientes preocupaciones sobre el medio ambiente, la salud humana y el maltrato animal, los análogos de carne se han convertido en uno de los temas más relevantes tanto en la industria alimentaria como en la comunidad de investigación en la última década (Finnigan et al., 2017), por esta razón es imprescindible buscar opciones para reemplazar la carne con fuentes de proteínas más sostenibles. Actualmente, una marca de micoproteína Quorn™ se vende legalmente en todos los países de la Unión Europea, así como en Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, Canadá y más recientemente, en mercados asiáticos como un ingrediente en productos alimenticios refrigerados o congelados con un estimado de 5 mil millones de porciones consumidas en todo el mundo desde su lanzamiento (Finnigan et al., 2017). Se estima que el mercado de micoproteína en los Estados Unidos representará casi 149.6 millones de dólares en 2030, mientras que en China la segunda economía más grande del mundo, se prevé que alcance un tamaño de mercado de 167.7 millones de dólares en 2030 (Derbyshire & Delange, 2021).

Es necesario llevar a cabo más investigaciones respecto a los beneficios para la salud de la micoproteína, especialmente los efectos sobre el perfil lipídico plasmático (colesterol total), la saciedad y la síntesis de proteínas musculares, dado que los estudios publicados tienen limitaciones como corta duración y tamaños de muestra pequeños al evaluar estos efectos. Investigar los potenciales de la micoproteína y sus interacciones para aplicaciones específicas en otros productos o alimentos como productos lácteos, aderezos y mayonesa por sus beneficios para la salud. Y profundizar en las investigaciones y caracterización sobre la micoproteína producida por otros hongos por ejemplo los basidiomicetos o llamados hongos superiores. Además, se debe realizar investigación adicional sobre cómo reducir los desechos del proceso de producción sin afectar la efectividad.

5 CONCLUSIÓN

La micoproteína representa una alternativa revolucionaria ante los desafíos alimentarios y ambientales del siglo XXI. Su producción, basada en procesos biotecnológicos sostenibles que emplean residuos agroindustriales o sustratos de fácil acceso, no solo ofrece una solución eficiente y escalable, sino que también es respetuosa con el medio ambiente a diferencia de la carne animal. Su perfil nutricional, comparable e incluso superior al de varias fuentes animales y vegetales, refuerza su papel como un alimento capaz de mejorar la salud pública global. Sin embargo, para poder consolidarla y maximizar su impacto, es necesario superar ciertos retos, como la optimización de procesos productivos, el aprovechamiento de nuevas especies fúngicas y la generación de mayor evidencia científica sobre sus beneficios en la salud a largo plazo. Además, se requiere una mayor aceptación por parte del consumidor, lo cual demanda estrategias efectivas de comunicación y educación alimentaria.



REFERENCIAS

- Ahmad M, Farooq S, Alhamoud Y, Li C, & Zhang H, (2022) A review on mycoprotein: History, nutritional composition, production methods, and health benefits. *Trends in Food Science and Technology*, 121(January): 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.027>
- Colosimo R, Warren F, Edwards C, Finnigan T, & Wilde P, (2020) The interaction of α -amylase with mycoprotein: Diffusion through the fungal cell wall, enzyme entrapment, and potential physiological implications. *Food Hydrocolloids*, 108(February), 106018. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106018>
- Derbyshire E, & Delange J, (2021) Fungal Protein – What Is It and What Is the Health Evidence? A Systematic Review Focusing on Mycoprotein. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5(February). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.581682>
- Elkhateeb W, (2021) Highlights on Chaetomium morphology, secondary metabolites and biological activities. *Pharmaceutics and Pharmacology Research*, 4(1): 01–05. <https://doi.org/10.31579/2693-7247/033>
- Elkhateeb W, (2022) Fungal Protein (Mycoprotein) What to Know About. *Open Access Journal of Pharmaceutical Research*, 6(4). <https://doi.org/10.23880/oajpr-16000273>
- FAO & OECD (2023). OECD-FAO Agricultural Outlook 2023–2032. Food and Agriculture Organization of the United Nations & Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Finnigan T, Needham L, & Abbott C, (2017) Mycoprotein: A Healthy New Protein With a Low Environmental Impact. *In Sustainable Protein Sources* (Issue Ec 1997). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00019-6>
- Giavasis I, Seviour R, Hudman P, & McNeil B, (2019) Fungal Bioproducts for Use in Food: Polysaccharides, Organic Acids, and Mycoprotein. *In Advances in Food Bioproducts and Bioprocessing Technologies* (Issue February). <https://doi.org/10.1201/9780429331817-25>
- Hashempour-Baltork F, Khosravi-Darani K, Hosseini H, Farshi P, & Reihani S, (2020). Mycoproteins as safe meat substitutes. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119958. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119958>
- Majumder R, Miatu S, Saha A, & Hossain S, (2023) Mycoprotein: production and nutritional aspects: a review. *Sustainable Food Technology*, 2(1): 81–91. <https://doi.org/10.1039/d3fb00169e>
- Łysakowska, P., & Sobota, A. (2023). Medicinal Mushrooms: Their Bioactive Components, Nutritional Value and Application in Functional Food Production — A Review.
- Naciones Unidas [UN], (2024) World Population Prospects 2024. *In United Nation* (Issue 9). www.un.org/development/desa/pd/
- Nie, C., He, T., Zhang, W., Zhang, G., & Ma, X. (2018). Branched chain amino acids: Beyond nutrition metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(4). <https://doi.org/10.3390/ijms19040954>
- ONUAA, (2017) El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos. *El Futuro de La Agricultura y La Alimentación*, 1(1): 44.
- Pobiega, K., Joanna, S., Pakulska, A., Latoszevska, M., Micho, A., Duda, W., Szafraniuk, J., Kufel, A., Dominiak, Ł., Lis, Z., Klusek, E., Kozicka, E., Wierzbicka, A., Rybak, K., Kot, A. M., Nowacka, M., & Trusi, M. (2024). Fungal Proteins: Sources, Production and Purification Methods, Industrial Applications, and Future Perspectives. *MDPI, Applied Sciences*, 14, 1–21.
- Ritala, A., Häkkinen, S. T., Toivari, M., & Wiebe, M. G. (2017). Single cell protein—State-of-the-art, industrial landscape and patents 2001–2016. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2009. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009>
- Łysakowska, P., & Sobota, A. (2023). Medicinal Mushrooms: Their Bioactive Components, Nutritional Value and Application in Functional Food Production — A Review.
- Pobiega, K., Joanna, S., Pakulska, A., Latoszevska, M., Micho, A., Duda, W., Szafraniuk, J., Kufel, A., Dominiak, Ł., Lis, Z., Klusek, E., Kozicka, E., Wierzbicka, A., Rybak, K., Kot, A. M., Nowacka, M., & Trusi, M. (2024). Fungal Proteins: Sources, Production and Purification Methods, Industrial Applications, and Future Perspectives. *MDPI, Applied Sciences*, 14, 1–21.
- Rubia, A., Trindade, D. F., Hilario, I. D. B., Aparecido, E., Ant, L., Giatti, C., Souza, M. De, Dantas, M. P., Mayara, B., Carvalho, R., Corr, G., & Yamaguchi, N. U. (2025). Sustainable Production of Alternative Proteins from Basidiomycetes: Valorization of Mycelial and Fruiting Body Biomass. *MDPI, Processes*, 13, 1–23.
- Singh, S and Gaur, S. (2021) Fungal Byproducts in Food Technology in Fungi. *In sustainable food production. Edited by Dai X, Sharma M, & Chen J. Springer* (1–17pp). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-85012-5>.
- Sui, X., Zhang, T., & Zhang, X. (2024). High-Moisture Extrusion of Plant Proteins: Fundamentals of Texturization and Applications. *Annual Review of Science and Technology*, 15, 125–150.
- Trinci A, (1992) Myco-protein: A twenty-year overnight success story. *Mycological Research*, 96(1): 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80989-1](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80989-1)
- Whitnall T, & Pitts N, (2019) Global trends in meat consumption - analysis of global meat consumption trends. *Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, March*, 96–99. http://www.agriculture.gov.au/SiteCollectionDocuments/abares/agriculture-commodities/AgCommodities201903_MeatConsumptionOutlook_v1.0.0.pdf

MAÍZ AJO: EL "NEANDERTAL" DE LOS MAÍCES NATIVOS DE MÉXICO

Uber Isaí Zarco Ramírez¹, Laura Hernández-Padilla^{1,2} y Homero Reyes de la Cruz¹.

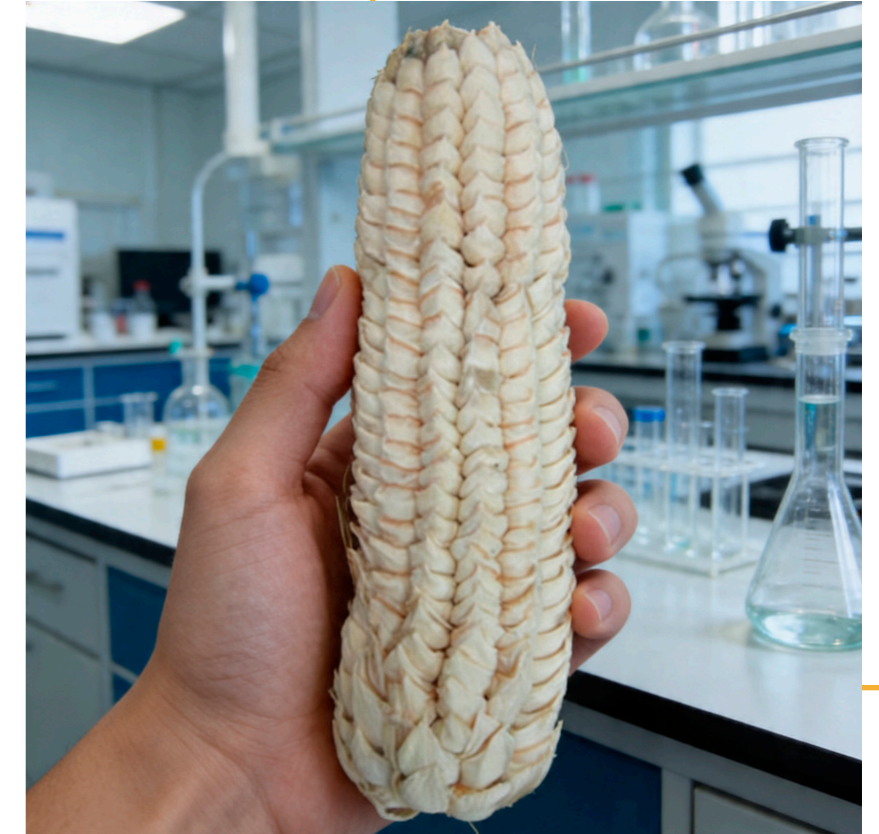
¹Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. ²Investigadora por México de la SECIHTI, Morelia, Mich., México.

Contacto: uber.isai.zarco@umich.mx

RESUMEN

El maíz es un componente esencial de la identidad cultural y alimentaria de México. A lo largo del territorio nacional existen numerosas variedades nativas, muchas de ellas estrechamente vinculadas a prácticas culturales y rituales. Entre estas destaca el maíz ajo o maíz tunicado (*Zea mays* var. *tunicata*), una variedad poco común caracterizada porque cada uno de sus granos se encuentra cubierto por una gluma con apariencia foliar, resultado de una mutación genética dominante. A diferencia de otros maíces criollos, el maíz ajo no posee un uso culinario o comercial, lo que lo convierte en una rareza agrícola. No obstante, su permanencia a lo largo del tiempo ha sido posible gracias a su profundo valor simbólico y ritual en comunidades indígenas, como la de San Juan Ixtenco, en el estado de Tlaxcala. Actualmente, esta variedad se enfrenta a diversos riesgos, entre ellos la pérdida de agricultores tradicionales, la migración de las nuevas generaciones y el reemplazo por maíces híbridos. En este artículo se revisan las características morfológicas, genéticas y culturales del maíz ajo, así como los principales desafíos para su conservación, destacando su relevancia como patrimonio biocultural de México.

Palabras clave: Identidad cultural, Maíz nativo, Maíz tunicado, Conservación



ABSTRACT

Maize is an essential component of Mexican cultural and food identity. Throughout the country, numerous native maize varieties persist, many of which are closely linked to cultural and ritual practices. Among them, ajo or tunicated maize (*Zea mays* var. *tunicata*) stands out as an uncommon variety characterized by each kernel being individually enclosed by a leaf-like glume, a trait caused by a dominant genetic mutation. Unlike other native maize landraces, tunicated maize has no culinary or commercial use, which makes it an agricultural curiosity. Nevertheless, its survival over time has been largely due to its symbolic and ritual significance in indigenous communities, such as San Juan Ixtenco in the state of Tlaxcala, Mexico. Currently, this maize variety faces several threats, including the loss of traditional farmers, migration of younger generations, and replacement by hybrid maize varieties. This article reviews the morphological, genetic, and cultural characteristics of tunicated maize, as well as the main challenges associated with its conservation, highlighting its importance as part of Mexico's biocultural heritage.

1 EL MAÍZ MÁS ALLÁ DE LA ALIMENTACIÓN: DIVERSIDAD Y SIGNIFICADO CULTURAL

El maíz es mucho más que un cultivo en México: es un símbolo profundamente arraigado en la historia, la cultura y la vida cotidiana del país. El maíz es ese grano sagrado que de manera silenciosa mejora cada recoveco de nuestra cocina (Fernández-Suárez et al., 2013). Desde tiempos prehispánicos, esta planta ha acompañado el desarrollo de las civilizaciones mesoamericanas y, hasta la actualidad, continúa siendo la base de la alimentación mexicana. No hay mexicano que, al salir del país, no añore preparaciones tradicionales como los tacos, las enchiladas, los chilaquiles, el *vasolote* —denominación utilizada en Morelia, Michoacán, para el elote cocido servido en vaso—, así como muchas otras expresiones de la gastronomía basada en el maíz.

Además de su importancia alimentaria, el maíz presenta una extraordinaria diversidad genética y morfológica, reflejada en la gran cantidad de razas y variedades nativas que se cultivan a lo largo del territorio mexicano. Muchas de estas variedades criollas han sido seleccionadas y conservadas por generaciones de agricultores, no solo por sus características agronómicas, sino también por su valor cultural, simbólico y ritual. Esta diversidad constituye un patrimonio biocultural que vincula el conocimiento tradicional con la biodiversidad agrícola.

Dentro de este amplio abanico de maíces nativos existen variedades cuyo valor no radica en su productividad ni en su uso culinario, sino en su significado cultural. Tal es el caso del maíz ajo o maíz tunicado (*Zea mays* var. *tunicata*), una variedad poco común que se distingue por una morfología singular y una historia estrechamente ligada a prácticas rituales y cosmovisiones indígenas. A pesar de carecer de un uso comercial, el maíz tunicado ha logrado persistir hasta nuestros días gracias al papel que desempeña en comunidades específicas.



2 EL MAÍZ Y SU PAPEL EN LA IDENTIDAD CULTURAL MEXICANA

Hablar del maíz en México implica necesariamente hablar de identidad, historia y pertenencia. Desde su domesticación a partir del teocintle, el maíz se convirtió en el eje central de la alimentación y la cosmovisión de los pueblos mesoamericanos (Goodman et al 1988). Esta relación trascendió lo meramente productivo y dio lugar a un profundo vínculo simbólico que se refleja en mitos de origen, rituales agrícolas y prácticas comunitarias que aún persisten en diversas regiones del país.

A lo largo del tiempo, las comunidades campesinas e indígenas han desarrollado y conservado una amplia diversidad de maíces nativos, adaptados a condiciones ambientales específicas y a necesidades culturales particulares. Estas variedades no solo representan una fuente de alimento, sino también un reservorio de conocimiento tradicional transmitido de generación en generación. El color del grano, la forma de la mazorca y el uso específico de cada variedad responden a criterios culturales tan importantes como los agronómicos (Fernández-Suárez et al. 2013).

En muchas regiones de México, ciertos maíces están destinados a preparaciones específicas, como los granos blancos de gran tamaño utilizados para el pozole, los maíces morados empleados en la elaboración de atoles y tortillas, o aquellos destinados a dulces tradicionales de origen prehispánico. Estos usos diferenciados reflejan una relación íntima entre la diversidad del maíz y la diversidad cultural del país, donde cada variedad cumple una función particular dentro del contexto social y simbólico de la comunidad (Guevara-Hernández et al. 2019).

En este sentido, la conservación de los maíces nativos no puede entenderse únicamente desde una perspectiva agrícola o productiva. Se trata también de preservar prácticas culturales, saberes ancestrales y formas de vida estrechamente ligadas al cultivo del maíz. La pérdida de estas variedades implicaría no solo una disminución de la diversidad genética, sino también un empobrecimiento del patrimonio cultural de México.

3 MAÍZ AJO: UNA RAREZA ANCESTRAL

Entre la gran diversidad de maíces nativos presentes en México, el maíz ajo o maíz tunicado (*Zea mays* var. *tunicata*) destaca por poseer una morfología inusual que lo diferencia claramente del resto de las variedades cultivadas (Riviera-Hernández et al. 2024). Esta característica particular ha despertado el interés tanto de investigadores como de personas ajenas al ámbito académico, al tratarse de una forma de maíz que rompe con la imagen convencional de la mazorca conocida por la mayoría de la población.

3.1. Origen y morfología singular



Figura 1. Comparación de una mazorca de maíz comercial (H) y una de maíz ajo (I). Las imágenes se tomaron del trabajo de Hang J. J. et al., (2012)

La principal característica del maíz ajo es que cada uno de sus granos se encuentra cubierto de manera individual por una estructura similar a una hoja, conocida como gluma (Imagen 1). Estas glumas envuelven completamente al grano, dándole a la mazorca una apariencia peculiar que recuerda a una túnica o a la estructura que recubre los dientes de una cabeza de ajo, de donde derivan sus nombres comunes (Imagen 2). Esta morfología se suma a la cobertura externa de totomoxtle, presente en la mayoría de las variedades de maíz, lo que hace que la mazorca del maíz tunicado resulte aún más distintiva (Sangermán-Jarquín et al. 2018).

Antes de comprender el origen genético de esta característica, el maíz tunicado fue considerado durante algún tiempo como un posible ancestro del maíz cultivado. Esta hipótesis surgió debido a su apariencia “primitiva” y a la presencia de estructuras que recuerdan a formas más antiguas

de las gramíneas. Sin embargo, estudios posteriores descartaron esta idea y demostraron que el maíz ajo no representa una etapa evolutiva previa, sino una variante derivada del maíz domesticado que presenta una mutación específica responsable de su morfología (Mangelsdorf y Reeves 1939).

La singularidad del maíz tunicado no se limita a su aspecto visual. La presencia de glumas que envuelven individualmente a cada grano dificulta su procesamiento y consumo, lo que explica en gran medida la ausencia de un uso culinario o comercial de esta variedad. No obstante, esta misma característica ha sido clave para su reconocimiento y preservación dentro de ciertos contextos culturales, donde su forma excepcional adquiere un significado simbólico más allá de su utilidad alimentaria (Imagen 3).



Figura 2. Variantes del maíz ajo o tunicado exhibidas en la casa del maíz. Las imágenes se tomaron en la casa del maíz localizada en San Juan Evangelista, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, propiedad del activista Ezequiel Cárdenas Rodríguez.



Figura 3. Ofrenda para pedir un buen temporal para los cultivos. La imagen se tomó en la casa del maíz localizada en San Juan Evangelista, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, propiedad del activista Ezequiel Cárdenas Rodríguez.

3.2. Base genética de la mutación tunicata

La morfología distintiva del maíz ajo es el resultado de una alteración genética específica que afecta el desarrollo normal de la mazorca. Estudios moleculares han demostrado que esta característica está asociada a una mutación dominante en el locus *Tunicate1* (*Tu1*), el cual regula la formación de las estructuras florales que posteriormente dan origen a los granos de maíz (Han et al. 2012).

En condiciones normales, durante el desarrollo de la mazorca, las glumas —estructuras protectoras presentes en las flores— se reducen considerablemente, permitiendo que los granos queden expuestos una vez retirada la hoja externa o totomoxtle. En el maíz tunicado, esta reducción no ocurre de manera adecuada, lo que provoca que las glumas crezcan y envuelvan individual-

mente a cada grano, dando lugar a la apariencia característica de esta variedad.

Desde una perspectiva genética, esta mutación no confiere ventajas agronómicas evidentes, como mayor rendimiento o resistencia a plagas, lo que explica por qué el maíz ajo no fue favorecido en procesos de selección agrícola orientados a la producción (Guzzon et al. 2021). Sin embargo, su persistencia sugiere que la selección ejercida por las comunidades que lo cultivan no responde únicamente a criterios productivos, sino a valores simbólicos, rituales y culturales.

El estudio de la mutación *tunicata* ha resultado de interés para la biología del desarrollo vegetal, ya que permite comprender mejor los mecanismos genéticos que controlan la formación de las estructuras reproductivas del maíz (Han et al. 2012). Al mismo tiempo, este caso ejemplifica cómo una modificación genética que no resulta funcional desde el punto de vista agrícola puede adquirir relevancia y significado en contextos culturales específicos.

4

IMPORTANCIA CULTURAL Y RITUAL DEL MAÍZ AJO

A pesar de no tener un uso alimentario o comercial, el maíz ajo ocupa un lugar significativo dentro de la vida cultural y espiritual de algunas comunidades indígenas de México. Su cultivo y preservación no responden a criterios productivos, sino a su valor simbólico y ritual, el cual ha sido transmitido a lo largo de generaciones. Un ejemplo emblemático de esta relación se encuentra en la comunidad de San Juan Ixtenco, en el estado de Tlaxcala, donde el maíz tunicado forma parte de prácticas ceremoniales que refuerzan la identidad colectiva y el vínculo con la tierra (Sangermán-Jarquín et al. 2018).

En estos contextos, el maíz ajo no es concebido únicamente como una planta, sino como un elemento cargado de significado que participa en rituales asociados a los ciclos agrícolas, la fertilidad y la protección de las cosechas. Su morfología singular, tan distinta a la de otros maíces, contribuye a esta carga simbólica, ya que lo convierte en un objeto visualmente poderoso y fácilmente reconocible dentro de las ceremonias. La permanencia del maíz tunicado a lo largo de la historia resulta aún más notable si se conside-

ra el periodo de la conquista y la colonia. Durante estos siglos, muchas prácticas religiosas indígenas fueron perseguidas o sustituidas por rituales impuestos por la corona española, lo que pudo haber puesto en riesgo la continuidad de cultivos asociados a dichas prácticas (Sangermán-Jarquín et al. 2018). En este sentido, el hecho de que el maíz ajo haya sobrevivido hasta la actualidad sugiere una resistencia cultural silenciosa, sostenida por comunidades que resguardaron no solo la semilla, sino también el significado que esta representaba.

En tiempos más recientes, además de las comunidades indígenas, el interés por el maíz ajo ha sido retomado por organizaciones y colectivos dedicados a la conservación de la diversidad biocultural, así como por agricultores y coleccionistas que reconocen su valor histórico y simbólico. Estas iniciativas han contribuido a visibilizar la importancia de esta variedad y a generar conciencia sobre la necesidad de preservar maíces cuya relevancia trasciende el ámbito productivo (García-Martínez et al. 2022).

5

RETOS ACTUALES PARA LA CONSERVACIÓN DEL MAÍZ AJO

En la actualidad, el maíz ajo enfrenta diversos desafíos que ponen en riesgo su permanencia a largo plazo. Uno de los principales es la reducción del número de agricultores que lo cultivan. En muchas comunidades indígenas, los guardianes de estas semillas son personas de edad avanzada, mientras que las generaciones más jóvenes migran hacia centros urbanos en busca de oportunidades económicas, lo que limita la transmisión intergeneracional del conocimiento agrícola y cultural asociado a esta variedad.

Otro reto importante es el avance de la agricultura industrial y la expansión de maíces híbridos en regiones cercanas a las zonas donde tradicionalmente se cultiva el maíz tunicado. Estas variedades comerciales, promovidas por su alto rendimiento, tienden a desplazar a los maíces nativos y, además, pueden favorecer el cruzamiento genético, lo que pone en riesgo la integridad de las características morfológicas del maíz ajo y contribuye a su posible pérdida como variedad distintiva (Riviera-Hernández et al. 2024).

A estos factores se suma la falta de reconocimiento del valor del maíz ajo fuera de los contextos comunitarios donde se conserva. Al no tener un uso comercial directo, su importancia suele ser subestimada, tanto en políticas agrícolas como en programas de conservación. Sin embargo, esta visión limitada ignora el papel fundamental que desempeñan estas variedades en la preservación de la diversidad genética y cultural del maíz en México.

Frente a este panorama, la conservación del maíz ajo requiere estrategias que integren el conocimiento tradicional con enfoques contemporáneos de conservación de la biodiversidad. El fortalecimiento de iniciativas comunitarias, la documentación de prácticas culturales y el reconocimiento del valor biocultural de esta variedad son acciones clave para evitar su desaparición y asegurar su permanencia como parte del patrimonio agrícola y cultural del país.

6 CONCLUSIONES

El maíz ajo o maíz tunicado representa un ejemplo singular de la estrecha relación entre diversidad biológica y diversidad cultural en México. A pesar de no poseer un valor productivo o comercial, esta variedad nativa ha logrado mantenerse vigente gracias a su profundo significado simbólico y ritual en comunidades indígenas que han actuado como guardianas de la semilla y del conocimiento asociado a su cultivo.

Las características morfológicas y genéticas del maíz tunicado, resultado de una mutación dominante, lo distinguen claramente de otras variedades de maíz y han despertado el interés científico por comprender los mecanismos que regulan el desarrollo de la mazorca. Sin embargo, más allá de su relevancia biológica, su importancia radica en el papel que desempeña como elemento identitario y cultural.

Actualmente, el maíz ajo enfrenta amenazas significativas derivadas de la pérdida de agricultores tradicionales, la migración de las nuevas generaciones y el desplazamiento por variedades híbridas. Estos factores ponen en riesgo no solo la conservación de una variedad específica, sino también la continuidad de prácticas culturales ancestrales.

La preservación del maíz tunicado requiere reconocer su valor como patrimonio biocultural y promover estrategias de conservación que integren el conocimiento tradicional, la investigación científica y la participación comunitaria. Documentar y difundir la importancia de variedades como el maíz ajo es un paso fundamental para sensibilizar sobre la necesidad de proteger la diversidad de los maíces nativos de México.



7 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las comunidades indígenas que, a través de su trabajo cotidiano y de la transmisión de saberes ancestrales, han contribuido a la conservación de los maíces nativos de México, en particular del maíz ajo. De manera especial, se reconoce la labor de la *Casa del Maíz*, ubicada en la comunidad de San Juan Evangelista, municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, proyecto impulsado por el activista Ezequiel Cárdenas Rodríguez. Asimismo, se agradece a los investigadores y a las organizaciones dedicadas al estudio y la preservación de la diversidad biocultural del maíz, cuyo trabajo ha permitido documentar y visibilizar la importancia de estas variedades, en particular al Laboratorio Nacional CONAHCYT de Bioseguridad Agroalimentaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, al Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas (LNC-BIOSAA-UMSNH-IIQB) y a la SECIHTI.

REFERENCIAS

- Fernández-Suárez, R., Morales-Chávez, L. a., & Gálvez-Mariscal, A. (2013). Importance of Mexican Maize Landraces in the National Diet. *an Essential Review. Rev. Fitotec. Mex.*, 36.
- GARCÍA-MARTÍNEZ, L. E. (2022). La importancia de la perspectiva territorial para la protección de los maíces nativos en México. *Revista espacialidades*, 12(2), 52-69.
- Goodman, M. M., & Galinat, W. C. (1988). The history and evolution of maize. *Critical reviews in plant sciences*, 7(3), 197-220.
- Guevara-Hernández, F., Hernández-Ramos, M. A., Basterrechea-Bermejo, J. L., Pinto-Ruiz, R., Venegas-Venegas, J. A., Rodríguez-Larramendi, L. A., & Cadena-Iñiguez, P. (2019). Maíces locales; una contextualización de identidad tradicional. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 51(1), 369-381.
- Guzzon, F., Arandia Rios, L. W., Caviedes Cepeda, G. M., Céspedes Polo, M., Chavez Cabrera, A., Muriel Figueroa, J., ... & Pixley, K. V. (2021). Conservation and use of Latin American maize diversity: Pillar of nutrition security and cultural heritage of humanity. *Agronomy*, 11(1), 172.
- Han, J. J., Jackson, D., & Martienssen, R. (2012). Pod corn is caused by rearrangement at the Tunicate1 locus. *Plant Cell*, 24(7). <https://doi.org/10.1105/tpc.112.100537>
- Mangelsdorf, P. C., & Reeves, R. G. (1939). The origin of indian corn and its relatives. *Texas Agricultural Experiment Station*.
- Rivera-Hernández, G., Tijerina-Castro, G. D., Cortés-Pérez, S., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2024). Evaluation of functional plant growth-promoting activities of culturable rhizobacteria associated to tunicate maize (*Zea mays* var. tunicata A. St. Hil), a Mexican exotic landrace grown in traditional agroecosystems. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1478807.
- Sangermán-Jarquín, D. M., De la O-Olán, M., Gámez-Vázquez, A. J., Navarro-Bravo, A., Ávila-Perches, M. Á., & Schwentesius-Rindermann, R. (2018). ETNOGRAFÍA Y PREVALENCIA DE MAÍCES NATIVOS EN SAN JUAN IXTENCO, TLAXCALA, CON ÉNFASIS EN MAÍZ AJO (*Zea mays* var. tunicata A. St. Hil.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(4). <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4.451-459>

Antibióticos, la cronología de un gran descubrimiento transformado en amenaza

Rafael A. Salinas Domínguez¹, Shirley E. Martínez Tolibia¹, Citlaly Gutiérrez Rodelo²,
Carlos David Ramos¹, Guillermo Santana¹, Ateet Dutt^{1*}

¹Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, CDMX, México.

²Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar S/N, Coyoacán, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, CDMX, México.

Autor de correspondencia: adutt@iim.unam.mx



RESUMEN

Desde 1928, el descubrimiento de la penicilina, el primer antibiótico empleado para el tratamiento de infecciones, está catalogado como uno de los momentos más cruciales en la historia de la medicina y del bienestar social, que contribuyó a la supervivencia humana incluso en tiempos de guerra. Sin embargo, la idea de emplear los antibióticos como fármacos "poderosos" capaces de tratar toda clase de enfermedades pronto puso en evidencia que no existen tratamientos milagrosos, y que el uso excesivo y descontrolado de antibióticos puede desencadenar problemas más graves para la salud de las personas. Tal es el caso de la resistencia a antibióticos manifestada por las bacterias, que son microorganismos capaces de multiplicarse y propagarse rápidamente incluso en presencia de diversos fármacos, lo cual ha representado un problema mundial que continúa extendiéndose en todos los niveles socioeconómicos de la población. En este artículo se muestra como los antibióticos son un hallazgo que continúa salvando muchas vidas, pero ahora la falta de conciencia y entendimiento sobre su uso racional nos presenta un nuevo reto, que podría ocasionar millones de pérdidas humanas en los próximos años si no se actúa al respecto.

Palabras clave: Antibióticos, multirresistencia, bacterias, mortalidad.

ABSTRACT

Since 1928, the discovery of penicillin, the first antibiotic used to treat infections, is considered one of the most crucial moments in the history of medicine and social welfare, contributing to human survival even in times of war. However, the idea of using antibiotics as "powerful" drugs capable of treating all kinds of diseases soon revealed that there are no miracle cures, and that excessive and uncontrolled use of antibiotics can trigger more serious health problems.

Antibiotic resistance in bacteria, which can multiply quickly even when drugs are present, has become a worldwide problem affecting people from all walks of life. This article explains how antibiotics are a life-saving discovery, but misuse and lack of awareness about their proper use create a serious threat that could lead to millions of deaths if not addressed.

Keywords: Antibiotics, multidrug resistance, bacteria, mortality

INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de los antibióticos nace como uno de los hallazgos más fascinantes y representativos de la medicina moderna. Todo comienza con la curiosidad de tratar de entender el mundo microscópico, desde la creación del microscopio con Anton van Leewenhoek quien llegó a observar el desconocido mundo microscópico, hasta la observación de cómo interactúan estos microorganismos con el resto de la vida en el planeta. Esto permitió que muchos científicos en el mundo dieran rienda suelta a su curiosidad para investigar cuáles eran estos organismos y qué tipo de enfermedades podrían estar asociados con ellos. El descubridor de lo que hoy conocemos como antibióticos fue el profesor de bacteriología Alexander Fleming en el Hospital Saint Mary de Londres. Su descubrimiento en 1928 cambió por completo el campo de la medicina y la microbiología, que posteriormente conoceríamos como el primer antibiótico de la historia, la penicilina. Los antibióticos son en general compuestos químicos producidos por hongos o bacterias como respuesta de defensa ante condiciones de estrés e invasión del hábitat por otros microorganismos (Pham, 2018). Por lo tanto, estos hallazgos representaron un gran avance en aquellos tiempos en los que las enfermedades en muchas ocasiones resultaban en desenlaces fatales. En las siguientes secciones se presentan detalles sobre la cronología de como este crucial descubrimiento ha tenido amplia aceptación para el tratamiento de infecciones, pero a la vez su uso excesivo a escala mundial ha generando un grave problema, la multirresistencia de bacterias (Villines, 2023).

2 ACCIDENTES FELICES, EL DESCUBRIMIENTO CLAVE

Aunque hay diferentes versiones de la historia, el descubrimiento de la penicilina se considera en general un accidente y es que Fleming tenía colonias de bacterias en diferentes placas de Petri; sin embargo, no las observó con detenimiento hasta regresar de sus vacaciones en septiembre de 1928. Al momento de analizar las placas, observó en una de ellas un área en la que crecía una gran mancha de moho, pero la zona alrededor del moho era clara como si hubiera esparcido algo que no permitía el crecimiento de bacterias a su alrededor. El nombre de ese hongo

era *Penicillium notatum*. Fleming hizo público su hallazgo en el *British Journal of Experimental Pathology* en 1929, y a partir de ahí inspiró a muchos otros científicos a descubrir los misterios que guardaban los hongos y la capacidad que estos tenían para eliminar bacterias causantes de enfermedades.

Es a partir de 1930 que comienza la investigación sobre el aislamiento de la penicilina, lo cual se logra en 1939 cuando un grupo de investigadores de la Universidad de Oxford liderados por Howard Flirey y Norman Heatley realizaron cultivos del hongo en contenedores adaptados para producirlo a mayor escala, con el objetivo

de conseguir purificar el compuesto activo a partir de filtraciones (Gaynes, 2017). Los científicos trabajaron arduamente para la producción de penicilina durante ese año, justo cuando el avance de la segunda guerra mundial empezaba a dificultar recursos y planes de investigación. A pesar de la guerra, la producción industrial y las necesidades de la penicilina fueron fundamentales a tal grado de que muchas empresas de la época se involucraron en la producción industrial de la penicilina (ACS, 1999), con lo cual comenzó a ser popular su uso para tratar diversos tipos de infecciones comunes y heridas de guerra que sin antibióticos eran incurables, salvando así millones de vidas (Bud, 2009).

3 EL BOOM DE LOS ANTIBIÓTICOS, LA GRAN PROMESA

En los siguientes años se popularizó tanto la producción de las penicilinas, que se comenzó a intensificar la investigación y la búsqueda de otros antibióticos. Entre la década de 1945 y 1978 se reportó que de los antibióticos descubiertos hasta entonces, cerca del 55% provenía del género *Streptomyces* y *Actinomyces*. Estos dos grandes grupos de bacterias son capaces de producir diversos compuestos antimicrobianos como tetraciclinas, cloranfenicol, lipoglicopéptidos, carbapenémicos, macrólidos, lincosamidas, entre otros, los cuales tienen gran potencial para evitar la proliferación de bacterias causantes de diversas enfermedades (Alam et al. 2022, Parra et al. 2023). Tal es el caso de las tetraciclinas que han sido ampliamente utilizadas para el tratamiento de enfermedades del tracto respiratorio, infecciones intestinales e incluso de transmisión sexual y cutáneas (Pearson et al. 2025). De hecho la neomicina y la estreptomycinas provenientes de actinomicetos fueron los primeros antibióticos activos probados contra la tuberculosis y otras enfermedades de relevancia (Waksman et al. 2010). Otro ejemplo importante son los macró-

lidos para el tratamiento de infecciones respiratorias como neumonía y faringitis, como alternativa para las personas alérgicas a las penicilinas (Bal, 2022). De esta manera, la investigación sobre estos novedosos fármacos fue creando una nueva perspectiva en la medicina, la esperanza de poder tratar diferentes tipos de enfermedades con nuevos medicamentos capaces de reducir la mortalidad.

Sin embargo esta expectativa alcanzó otros sectores, expandiendo el uso de antibióticos en otro tipo de actividades; por ejemplo, como suplemento en la alimentación de animales en el sector ganadero, llegando a representar un consumo estimado de entre 62 - 240 toneladas por año a escala global (Landers et al. 2012, Van Boeckel et al. 2015). Por si fuera poco, los antibióticos también se han usado en la apicultura, acuicultura, producción de etanol, horticultura, así como en la conservación de alimentos y plantas, e incluso como aditivos en productos de uso doméstico (Meek et al. 2015).

4 EL ESCALAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE ANTIBIÓTICOS Y EL CRECIMIENTO DE LA INDUSTRIA FARMACÉUTICA

A partir del descubrimiento de la penicilina, así como de otros antibióticos, diversos grupos de investigación e industrias de países europeos y estadounidenses se unieron para proponer estrategias biotecnológicas basadas en procesos de fermentación, escalamiento, purificación y optimización para la producción a gran escala de estos fármacos. Esto permitió un crecimiento gigantesco de la productividad para surtir la alta demanda, reportando ganancias valuadas en millones de dólares (Figura 1).

Así, los avances biotecnológicos han permitido la producción de grandes cantidades de antibióticos, principalmente a partir de fermentación en biorreactores mediante el control de diferentes parámetros fisicoquímicos como factores clave para mejorar la producción. Por otra parte, la biología sintética ha proporcionado herra-

mientas para el desarrollo de nuevas rutas de biosíntesis, entre las que destacan el rearreglo cromosomal, la amplificación del clúster genético de penicilina y mutaciones puntuales para inducir cambios metabólicos (Haque et al. 2024). Empresas como Lederle, Merck, Pfizer, Squibb y Abbott laboratories fueron empresas beneficiadas por el frente de guerra para incrementar la producción de penicilina en Europa (ACS, 1999). La razón de esta expansión acelerada ha sido en parte a la gran demanda e inversión que han hecho las industrias farmacéuticas en países de ingreso medio y bajo, derivado de la prevalencia de enfermedades infecciosas causadas por bacterias. Actualmente las firmas farmacéuticas que dominan el mercado comercial de antibióticos son compañías provenientes de EUA, Suiza, Inglaterra, Irlanda y Francia (Haque et al. 2024).

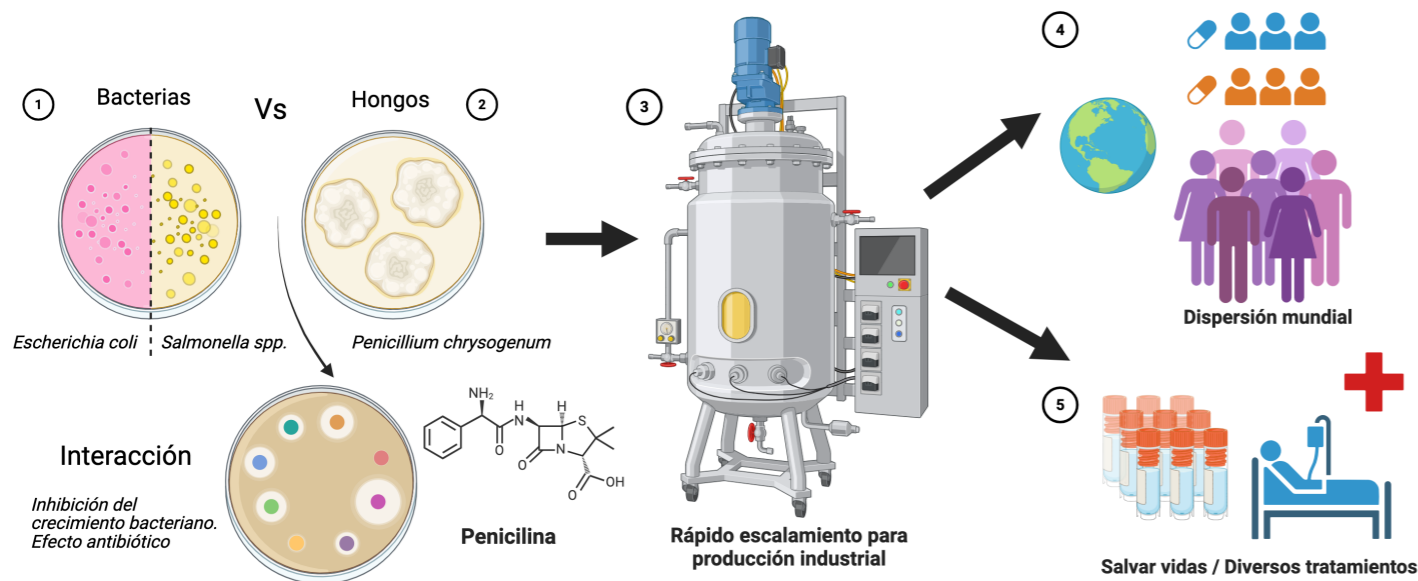


Figura 1. De lo micro a lo macro. Producción de penicilina y dispersión acelerada. (Creado en <https://BioRender.com>)

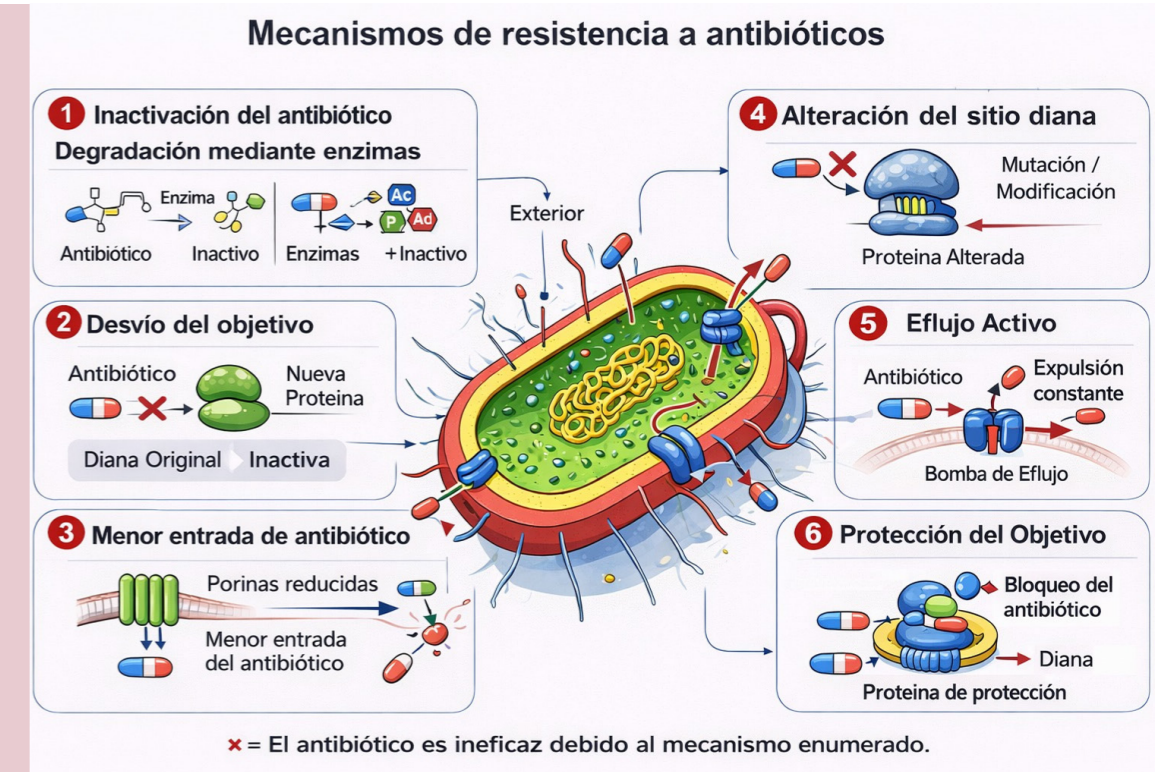
5 LAS BACTERIAS TAMBIÉN SE DEFIENDEN Y ADQUIEREN MULTIRRESISTENCIA

A partir de la extensa disponibilidad de antibióticos, el problema de bacterias resistentes a los tratamientos no tardó en aparecer. De hecho durante la década de 1940, apenas unos años después del descubrimiento de la penicilina, se empezaron a documentar los primeros casos de resistencia en bacterias como *Escherichia coli* y *Staphylococcus*, incluso en *Mycobacterium tuberculosis* en donde se reportó que hasta un 80% de pacientes tratados con penicilina sufrieron recaídas después de tres meses (Torres-Caycedo et al. 2018). Lo que se sabe actualmente es que debido a su acelerada velocidad de replicación, las bacterias pueden heredar diferentes mecanismos de resistencia a su progenie. El contacto constante y permanente con los antibióticos, ha propiciado que las bacterias evolucionen para desarrollar diferentes estrategias que les permitan defenderse y proliferar. Estos mecanismos se muestran en la Figura 2, los cuales van desde la inactivación de antibióticos a través mutaciones, o modificaciones de sus gru-

pos químicos hasta la producción de enzimas complejas, logrando que sean ineficaces y que a su vez, las bacterias puedan hacerse inmunes a la presencia de estos compuestos (Belay et al. 2024). Otros mecanismos de resistencia consisten en modificar las estructuras proteicas de membrana, incrementando o bloqueando las proteínas y receptores involucrados en los transportes activos y pasivos, disminuyendo así el intercambio de antibióticos. Al realizar esto, la bacteria puede excretar las moléculas dañinas, evitando que penetren a través de la membrana (Darby et al. 2022).

Otro problema asociado es el impacto negativo de los antibióticos al medio ambiente. En particular, la penicilina ha mostrado un incremento que va desde 9.8 a 14.3 dosis diarias definidas por cada 1000 habitantes de 2009 a 2018 (Browne et al. 2021). Se sabe también que hasta el 75% de las dosis administradas se eliminan del cuerpo a través de las heces, lo cual contribuye

Figura 2. Representación esquemática de los principales mecanismos de resistencia bacteriana a los antibióticos. Se ilustran seis estrategias: (1) inactivación enzimática del antibiótico, (2) desvío del objetivo mediante sustitución de la diana, (3) reducción de la entrada por disminución de las porinas, (4) alteración del sitio diana por mutación o modificación, (5) expulsión activa mediante bombas de eflujo y (6) protección del objetivo por proteínas específicas. Las "X" indican que el antibiótico se vuelve ineficaz debido al mecanismo señalado.



a que se vayan liberando ciertas concentraciones de antibiótico a los cuerpos de agua, incrementando la contaminación ambiental y a la transmisión de resistencia a bacterias patógenas del ambiente (Ferrari et al. 2003, Mobarki et al. 2019). Debido a lo anterior y aunado a la alta capacidad que tienen algunos microorganismos para propagarse rápidamente, se han desencadenado graves problemas de salud pública.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha clasificado en un grupo denominado ESKAPE a las bacterias de los géneros *Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Enterobacter spp.* los cuales representan un serio problema debido a sus altos niveles de infección (Darby et al. 2022).

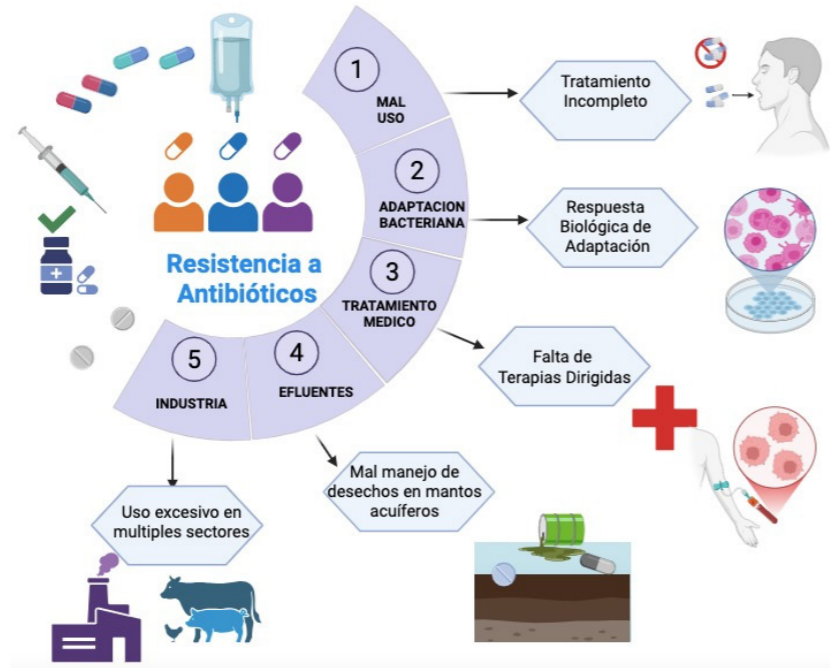


Figura 3. La resistencia a antibióticos y las diversas causas que lo originan

¿Por qué los antibióticos contribuyen a incrementar la resistencia en bacterias causando mortalidad en la población?

En sí mismos, los antibióticos no causan la muerte de las personas, al contrario son tratamientos que han demostrado ser eficaces para combatir enfermedades. El problema es que los humanos hemos contribuido a que se establezcan malos hábitos y prácticas respecto a su uso, empleándolos para muchas enfermedades que no los requieren, como las infecciones virales. Por lo tanto, el uso indiscriminado de antibióticos y no completar los tratamientos médicos o incluso automedicarse, contribuye a que el gran problema de resistencia se incremente cada vez más, causando así que las bacterias peligrosas sobrevivan y tengan la oportunidad de propagarse comprometiendo la salud de las personas (Figura 3). De acuerdo con las estadísticas reportadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), países como Mongolia y China han sido catalogados como grandes consumidores de antibióticos de diversos tipos, excediendo hasta en un 30% el límite recomendado por la OMS (WHO, 2018).

Para el caso de Latinoamérica, se ha reportado que las penicilinas son los antibióticos mayoritariamente consumidos, seguido de otros fármacos β-lactámicos, macrólidos y quinolonas (WHO, 2018). Este incremento en el consumo de antibióticos impacta directamente en la liberación de residuos contaminantes al ambiente, ya que cierto porcentaje de remanentes se libera del cuerpo humano a través de la orina y heces fecales. Esto da origen a un problema subalterno, ya que al liberar los remanentes de antibiótico en el ambiente, estos suelen descomponerse debido a reacciones de oxidación-reducción, hidrólisis, biodegradación y fotodegradación, lo que reduce su capacidad de eliminar bacterias. Esto causa que las bacterias estén expuestas a concentraciones subletales y adquieran adaptabilidad, generando bacterias con fenotipos multirresistentes (WHO, 2018, Tenover 2006).

Por otra parte, industrias del sector ganadero, avícola y de acuicultura también juegan un papel fundamental en esta cadena de propagación de antibióticos al ambiente. Por citar un ejemplo, en la producción de alimentos para animales en 2010 se utilizaron 63.151 toneladas de antibióticos, y se estima un aumento del 67% para 2030 (Van Boeckel et al. 2015). Es por ello que el factor ambiental juega también un papel clave en la propagación acelerada de antibióticos, ya que contaminan rápidamente el suelo, los cultivos y los cuerpos de agua subterránea y superficial (Mora-Gamboa et al. 2022). Por lo tanto, el incremento de efluentes tratados de manera inadecuada y el desecho irresponsable de antibióticos, provocan diversos focos de resistencia bacteriana que persisten y desencadenan infecciones más fuertes en los humanos, tornándose en un círculo vicioso difícil de controlar.

6 ESTADÍSTICA MUNDIAL DE MORTALIDAD. EL PROBLEMA SUBYACENTE

Desafortunadamente, las infecciones asociadas a bacterias multirresistentes ya ha cobrado millones de vidas alrededor del mundo. Esto sucede cuando los antibióticos disponibles ya no son efectivos para eliminar las bacterias causantes de la infección, por lo cual terminan por colonizar y proliferar, comprometiendo el buen funcionamiento de órganos y tejidos. Las estadísticas actuales apuntan a que tan sólo en 2021 la cifra estimada de muertes asociadas a bacterias resistentes a antibióticos fue de 4.71 millones, y se proyecta que para 2050 esta cifra pueda incrementar a 10 millones de fallecimientos si no se implementan las medidas necesarias para contener la propagación y controlar el uso de antibióticos (Naghavi et al. 2024). Diversos factores influyen en el éxito o fracaso de un tratamiento basado en antibióticos, tales como la edad de los pacientes, el tipo de infección, el tipo de microorganismo resistente, las comorbilidades del paciente, la rapidez con la que se ha tratado la enfermedad, entre otros (García-Lamberechts et al. 2017). En la Tabla 1 se muestran los principales microorganismos asociados con los fallecimientos por infecciones de bacterias multirresistentes a nivel mundial durante 2021, además presenta información relacionada con la mortalidad en el Caribe y Latinoamérica.

Género bacteriano	Resistencia a antibióticos reportada	No. de muertes asociadas	No. de muertes Globales
<i>Staphylococcus aureus</i>	Meticilina	9,240	130,000
<i>Acinetobacter baumannii</i>	Carbapenémicos Fluoroquinolonas	5,970 3,380	78,100 -----
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	Carbapenémicos	5,170	71,600
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Carbapenémicos Fluoroquinolonas	4,870 2,140	45,600 -----
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Carbapenémicos Aminoglucósidos	3,800 1,500	45,600 -----
<i>Escherichia coli</i>	Fluoroquinolonas	2,490	34,100

*Información obtenida a partir de Naghavi M. et al. 2024 DOI: 10.1016/S0140-6736(24)01867-1.

Tabla 1. Principales microorganismos con mortalidad global asociada en Latinoamérica y el Caribe durante 2021.

En el caso de México se han realizado esfuerzos para el control, prevención y combate a diferentes enfermedades y organismos de interés epidemiológico. En el caso específico de bacterias resistentes a antibióticos existe el Plan Universitario de Control de la Resistencia Antimicrobiana (PUCRA), una iniciativa que abre una red institucional con capacidad de realizar análisis bacteriológicos estandarizados, contribuyendo así a la vigilancia epidemiológica nacional. Con base en el reporte que comprende los años de 2017 – 2024, se analizaron 51,344 muestras provenientes de hemocultivos y 357,188 aislamientos de urocultivos concluyendo que las enterobacteriales *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae* son las de mayor prevalencia en ambos casos, siendo estos dos los microorganismos de principal interés en México. Adicionalmente, en los hospitales se reporta que los tres fármacos que continúan en los primeros lugares de consumo en pacientes hospitalizados son: 1° las cefalosporinas, 2°. los carbapenémicos, 3°. vancomicina. La resistencia es una realidad que se agrava cada día más, y lo alarmante es que cerca de la tercera parte de los aislamientos bacterianos se clasifican en las categorías MDR (multidrogorresistente) y XDR (extensamente resistente) (UNAM Red PUCRA, 2025).

7 CONCLUSION

La resistencia a antibióticos ha surgido como resultado del uso excesivo y la mala gestión de los fármacos, esto derivado de la falta de conciencia humana en cuanto al uso racional. Las malas prácticas de aplicación, han provocado una propagación cada vez más acelerada de bacterias multirresistentes y peligrosas que atentan contra la salud humana.

Por otra parte, el manejo de medicamentos caducos es un problema que se aborda de forma sistemática en diferentes países. En México existen normas que regulan los desechos farmacéuticos como la ley general para la prevención y gestión de residuos (SINAGREM, 2008), por medio de la cual se recolectan los fármacos para evitar contaminaciones cruzadas. Por ello, la disposición de antibióticos y medicamentos en general es un tema relevante que requiere una concientización en la población, para lograr que día a día se desechen menos antibióticos en efluentes y sistemas de alcantarillado público.

Se requiere un cambio de mentalidad y un gran compromiso como humanidad para rectificar los errores en cuanto al uso desmedido de antibióticos, de tal manera que las generaciones siguientes puedan preservar los ecosistemas y eviten replicar lo que hasta ahora se ha hecho mal, a fin de lograr disminuir las tasas de mortalidad en todo el mundo

8 AGRADECIMIENTOS

Rafael A. Salinas CVU:703153 agradece a la SECIHTI por la beca posdoctoral otorgada. Shirley E. Mtz. Tolibía CVU:703157 agradece a la beca L'oréal-UNESCO-AMC para mujeres en la Ciencia y a la SECIHTI por la beca posdoctoral otorgada. Ateet Dutt agradece por el proyecto PAPIIT IN100125 y, como representante técnico por el proyecto apoyado por la SECTEI (5159c25) "Detección óptica de variantes de *E. coli* resistente a antibióticos empleando nanoplateformas de ZnO como alternativa de rápida respuesta".



REFERENCIAS

- Pham P.V. (2018). Medical Biotechnology: Techniques and Applications. In Omics Technologies and Bio-Engineering. Edited by Debmalya Barh and Vasco Azevedo. Academic Press. 449-469 pp.
- Villines Z. (2023). What are some of the effects of overusing antibiotics? Online. Available from <https://www.medicalnewstoday.com/articles/effects-of-overusing-antibiotics>. (Fecha de revision Octubre 10, 2023).
- Gaynes R. (2017). The Discovery of Penicillin—New Insights After More Than 75 Years of Clinical Use. *Emerging Infectious Diseases*, 23(5), 849-853.
- American Chemical Society. International Historic Chemical Landmarks. Discovery and Development of Penicillin (RSC, 1999) <http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatschemistry/landmarks/flemingpenicillin.html>
- Bud R. (2009) Penicillin, Triumph and Tragedy. Oxford University Press. UK, 342 pp.
- Alam K., Mazumder A., Sikdar S., Zhao YM., Hao J., Song C., Wang Y., Sarkar R., Islam S., Zhang Y., Li A. (2022) Streptomyces: The biofactory of secondary metabolites. *Front Microbiol.* 13: 968053.
- Parra J., Beaton A., Seipke R., Wilkinson B., Hutchings M. and Duncan K. (2023) Antibiotics from rare actinomycetes, beyond the genus *Streptomyces*. *Current Opinion in Microbiology*, Elsevier. 76:102385.
- Pearson J.C., Gillett E., Gadri N.D., Dionne B.(2025) Tetracyclines, the old and the new: A narrative review. *CMI Communications*. 1: 105059.
- Waksman S.A., Schatz A., Reynolds D.M. (2010) Production of antibiotic substances by actinomycetes. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1:112-124.
- Bal A. M. (2022). Macrolide Antibiotics. In *Comprehensive Pharmacology*. Edited by Terry Kenakin. Elsevier. 170-184 pp.
- Landers T., Cohen B., Larson E. (2012) A Review of Antibiotic Use in Food Animals: Perspective, Policy, and Potential. *Sage Journals*. 127:1.
- Van Boeckel T., Brower C., Gilbert M., Laxminarayan R. (2015) Global trends in antimicrobial use in food animals. *PNAS*. 112 (18) 5649-5654.
- Meek RW, Vyas H, Piddock LJV (2015) Nonmedical Uses of Antibiotics: Time to Restrict Their Use? *PLoS Biol* 13(10): e1002266.
- Haque M. A., Nath N., Johnston T., Haruna S. Ahn J., Ovissipour R., Ku S. (2024) Harnessing biotechnology for penicillin production: Opportunities and environmental considerations. *Science of The Total Environment*. 946: 174236.
- Torres-Caycedo M.I., Castro-Gutiérrez L., Prada-Quiroga C., López-Velandia D. (2018) Antibiotic Resistance: Origins, evolution and healthcare-associated infections. *Salud Uninorte*. 34 (2): 494-505.
- Belay WY, Getachew M, Tegegne BA, Teffera ZH, Dagne A, Zeleke TK, Abebe RB, Gedif AA, Fenta A, Yirdaw G, Tilahun A and Aschale Y. (2024) Mechanism of antibacterial resistance, strategies and next-generation antimicrobials to contain antimicrobial resistance: a review. *Front. Pharmacol.* 15:1444781.
- Darby, E.M., Trampari, E., Siasat, P. et al. (2023) Molecular mechanisms of antibiotic resistance revisited. *Nat Rev Microbiol* 21: 280–295.
- Browne A. J., Chipeta M., Haines-Woodhouse G., Kumaran E. et al (2021) Global antibiotic consumption and usage in humans, 2000–18: a spatial modelling study. *The Lancet Planetary Health*. 5(12): E893-E904.
- Ferrari B., Paxéus N., Lo Giudice R., Pollio A., Garric J. (2003) Ecotoxicological impact of pharmaceuticals found in treated wastewaters: study of carbamazepine, clofibrac acid, and diclofenac. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 55(3): 359-370.
- Mobarki N., Almerabi B., Hattan A. (2019) Antibiotic resistance crisis. *International Journal of Medicine in Developing Countries*. 3(6):561–564.
- World Health Organization (WHO). Global Antimicrobial Resistance Surveillance System (GLASS) Report: Early Implementation 2016–2017; Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2017; 164p.
- Tenover, F.C. (2006) Mechanisms of antimicrobial resistance in bacteria. *Am. J. Infect. Control*. 34, s3–s10.
- Mora-Gamboa, M. P. C., Rincón-Gamboa, S. M., Ardila-Leal, L. D., Poutou-Piñales, R. A., Pedroza-Rodríguez, A. M., & Quevedo-Hidalgo, B. E. (2022). Impact of Antibiotics as Waste, Physical, Chemical, and Enzymatical Degradation: Use of Laccases. *Molecules*, 27(14), 4436.
- Naghavi et al. (2024). Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: a systematic analysis with forecasts to 2050. *The Lancet*. 404(10459): P1199-1226.
- García-Lamberechts, E.J., González-del Castillo, J., Hormigo-Sánchez, A.I., Núñez-Orantos, M.J., Candel, F.J., & Martín-Sánchez, F.J.. (2017). Factores predictores del fracaso al tratamiento antibiótico empírico. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 40(1), 119-130.
- Universidad Nacional Autónoma de México, Plan Universitario de Control de la Resistencia Antimicrobiana (PUCRA) (2025). Resistencia antimicrobiana en México 2017 a 2024. Reporte de los hospitales de la Red PUCRA: Resistencia antimicrobiana y consumo de antibióticos.

CAFÉS NATURALES: TRADICIÓN, CIENCIA Y SOSTENIBILIDAD

Mariela Concepción Meza Grande¹, Minerva Rosas Morales¹,
Ada María Ríos Cortés¹, Paula Montserrat Crespo Barrera²

¹Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada,
Tepetitla CP 90700, Tlaxcala, México. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal
Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, Mexico.

²Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Calle de la Reforma 168,
Campestre la Paz, CP 74420 Izúcar de Matamoros, Pue.

Email: mmezag2400@alumno.ipn.mx



RESUMEN

La producción de cafés naturales establece un método ancestral que ha adquirido relevancia en la investigación científica actual por su impacto en la calidad sensorial y en la sostenibilidad ambiental. Esta revisión analiza el café desde una perspectiva científica e histórica, revisa los principales métodos de procesamiento y profundiza en el proceso natural, caracterizado por el secado de la cereza completa. Se destacan los atributos sensoriales particulares de los cafés naturales, sus notas afrutadas y vinosas, así como la influencia de microorganismos, levaduras y bacterias ácido lácticas en la fermentación. Además, se comparan las cifras ambientales entre el proceso natural y el lavado, evidenciando que el primero reduce significativamente la huella hídrica. El perfil aromático y sensorial se presenta como un valor agregado en mercados de especialidad, aunque con retos de consistencia y control. En conclusión, la producción de cafés naturales representa un amplio campo para la investigación interdisciplinaria, integrando microbiología, química de alimentos y sostenibilidad, ofreciendo oportunidades para equilibrar tradición e innovación en la caficultura global.

Palabras clave:

café, natural, secado, sostenibilidad.



ABSTRACT

The production of natural coffees is an ancestral method that has gained relevance in contemporary scientific research due to its impact on sensory quality and environmental sustainability. This paper analyzes coffee from a historical and scientific perspective, reviews the main processing methods, and focuses on the natural process, characterized by drying the whole cherry. The sensory attributes of natural coffees, such as fruity and wine-like notes, are highlighted, along with the role of microorganisms, yeasts and lactic acid bacteria, in fermentation. Environmental figures comparing natural and washed processes show that the former significantly reduces water consumption and the overall water footprint. The aromatic and sensory profile is presented as an added value in specialty markets, although consistency and control remain challenges. In conclusion, natural coffee production represents a fertile field for interdisciplinary research, integrating microbiology, food chemistry, and sustainability, while offering opportunities to balance tradition and innovation in global coffee cultivation.

Keywords:

coffee, natural, drying, sustainability.

INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos agrícolas más relevantes a nivel mundial, tanto por su impacto económico como por su papel cultural y científico (Osorio et al., 2023). La complejidad intrínseca del café, compuesto por cafeína, ácidos clorogénicos, azúcares, lípidos, aminoácidos, minerales y vitaminas, hace esencial comprender estos elementos interconectados (Freitas et al., 2024). La investigación sobre los métodos de procesamiento ha permitido comprender cómo las prácticas tradicionales influyen en la calidad sensorial y en la sostenibilidad ambiental (ICO, 2021; FAO, 2020). Este documento aborda la producción de cafés naturales, un método ancestral que hoy se estudia con herramientas modernas de microbiología, química y ciencias ambientales, representa un puente entre tradición y modernidad.

El café también puede fomentar la sociabilidad, proporcionando un punto de encuentro y una pausa en la rutina diaria para muchas personas en todo el mundo (Freitas et al., 2024).

2. CAFÉ: CONTEXTO HISTÓRICO Y CIENTÍFICO

El café ha sido objeto de estudio desde múltiples disciplinas, incluyendo la historia (Pendergrast, 2010), la nutrición (Bressani, 2001) y la economía (Samper, 2019). En países como México y Colombia, el café representa un eje de identidad cultural y desarrollo rural. La ciencia moderna ha permitido caracterizar su composición química, destacando compuestos fenólicos, alcaloides y azúcares que determinan su perfil sensorial (Silva, 2019). Además, estudios más recientes han explorado la relación entre la genética de la planta y la calidad del grano (Worku et al., 2018).

La calidad de los granos de café está profundamente influenciada por diversos factores, incluyendo métodos de cosecha. En adición, el proceso postcosecha desempeña un papel crucial, afectando significativamente la composición química y los atributos sensoriales del café (Freitas et al., 2024).

2.1. Planta

El café se originó en África, en diferentes regiones geográficas y climáticas. Como grupo botánico está constituido por más de 100 especies de una gran familia pertenecientes al género *Coffea*. De acuerdo a la región y clima de origen se desarrollaron diferentes tipos de cafetos, con características genéticas diversas: porte y forma de planta, tamaño y color de fruto, resistencia a enfermedades, tolerancia a plagas, sabor de bebida, adaptabilidad y productividad. De este centenar de especies, resaltan dos que se cultivan comercialmente, *Coffea arabica* integrada por diferentes variedades de arábica y *Coffea canephora* formada por diferentes grupos de robusta (Peñuela & Sanz-Urbe, 2021).

2.2. Fruto y anatomía

Al fruto en estado de completa maduración de las plantas del cafeto se le conoce como cereza, misma que después de varios procesos se convertirá en una de las bebidas favoritas de aceptación universal (Pires et al., 2021).

La cereza de café consta, en respectivo orden, de la piel externa o epicarpio: conocida también como cáscara, piel o exocarpio, es la capa más externa de la cereza del café. El color del epicarpio al inicio es verde, tras la maduración dependerá de la variedad del café pero comúnmente es rojo (Gallego et al., 2023). Mucílago o mesocarpio: es la pulpa del fruto del café. Antes de que la cereza madure, el tejido es rígido. Con la maduración, da lugar a un hidrogel insoluble rico en azúcares y pectinas. Pergamino o endocarpio: es la capa más interna del pericarpio y es la cáscara que envuelve el grano de café. Está formado de 3 a 7 capas de células de esclerenquima. El pergamino se desprenderá en el descascariñado, es el primer paso en el proceso en seco. Se utilizan máquinas para eliminar los restos de fruta y el pergamino seco de los granos de café, aunque a veces el grano verde se vende con esta capa intacta como café pergamino. Piel plateada o perisperma: llamada también tegumento, es la capa más externa que cubre la semilla. Algunos residuos de la piel plateada continúan con el pre-tostado del grano y se desprenden durante el tostado del café. Endospermo o semilla, señalando que cada cereza de café suele contener en su interior dos semillas. Suelen tener una consistencia dura y de color verdoso o amarillento. El contenido químico del endospermo es de suma importancia ya que es el precursor del sabor y aroma del café tostado (Osorio et al., 2021). Cada capa puede observarse a detalle en la figura 1.

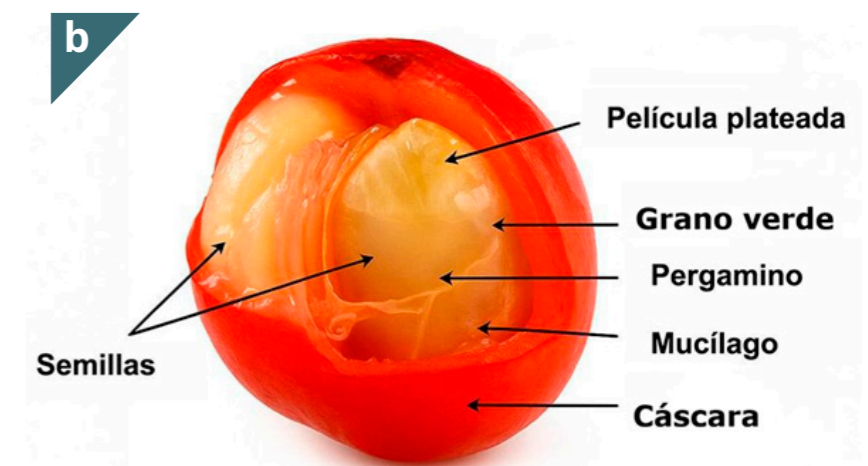
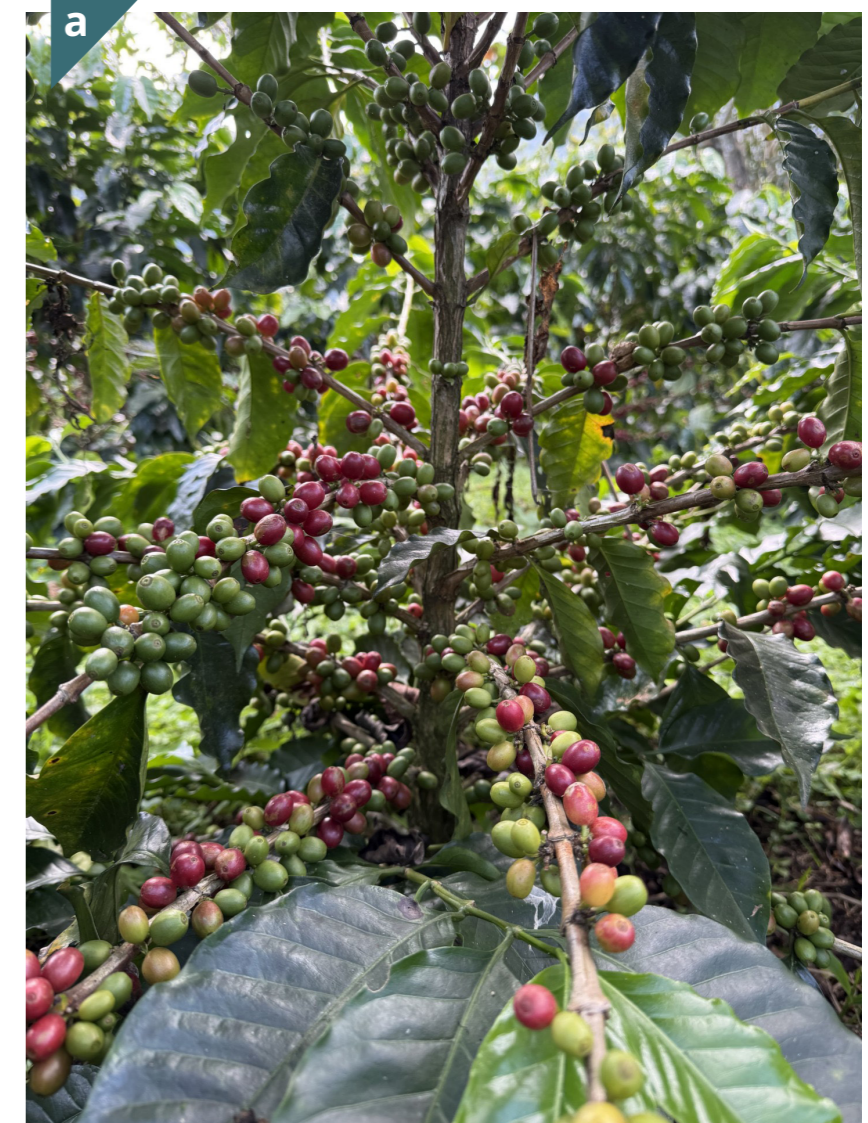


Figura 1. A) planta de café (imagen propia) y B) capas de la cereza de café. (CENICAFÉ, 2013)

2.3. Condiciones geográficas

Los granos que se tuestan, muelen y se usan para preparar la bebida de café son las semillas de un fruto. El cafeto, es decir, la planta, produce cerezas de café y los granos son las semillas, que se encuentran dentro de las cerezas (dos Santos Gomes et al., 2024).

La calidad de la bebida de café está determinada por un delicado equilibrio entre varias circunstancias, acciones y decisiones, que comienzan en el campo durante el cultivo y se extienden al almacenamiento, procesamiento y tueste de los granos. Tanto factores no genéticos como genéticos han sido demostrados como factores que afectan a la calidad de las bebidas. Se incluye, además, la fertilidad del suelo, los fertilizantes, el clima, la altitud y la salud de las plantas, la etapa de maduración del fruto en la cosecha, el procesamiento posterior y el trasfondo genético. De hecho, el café no se

cultiva en todas partes del mundo debido a las condiciones ambientales variables y ubicaciones geográficas. Se observan las condiciones óptimas para el crecimiento de la planta a nivel global dentro de la zona ecuatorial, también conocida como "El Cinturón de Café", ver figura 2. Esta región se extiende desde latitudes 25 grados norte hasta 30 grados sur (Zaman& Shan, 2024).

La altura tiene un impacto directo en el tamaño, forma y sabor del café. El de mejor calidad se produce entre 1,000 y 1,300 metros sobre el nivel del mar. Esto se debe a que el proceso de formación y maduración de los granos es más lento, provocando un desarrollo amplio de las sustancias aromáticas y de una acidez deseable (Coradi et al., 2008).

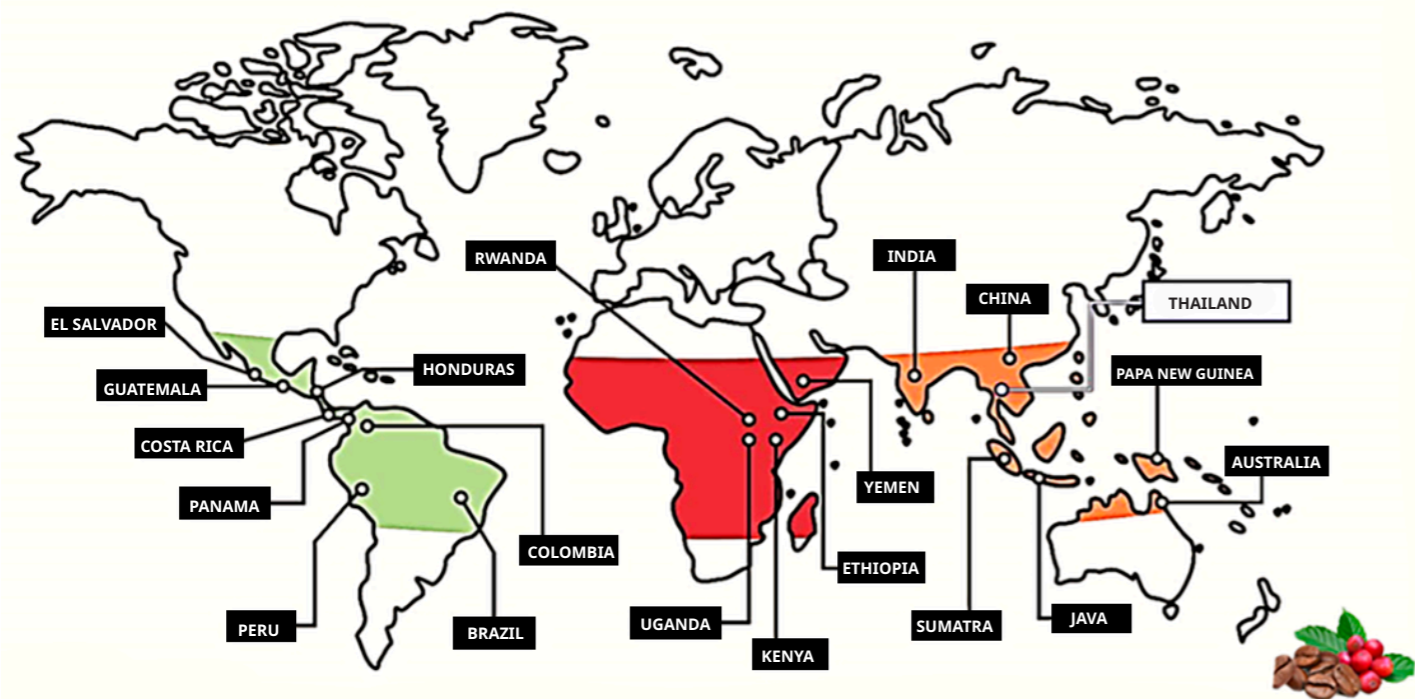


Figura 2. Cinturón de café. (Zaman& Shan, 2024)

2.4. Genotipo

Se refiere a la constitución genética completa de un individuo. El genotipo es un factor clave, ya que determina en gran medida características importantes como el tamaño y la forma de los granos, así como su color, composición química y sabor (Morales&Bolaños, 2023). Cada árbol está cubierto por hojas cerosas de color verde que crecen en pares y las cerezas de café

crecen a lo largo de las ramas. Dependiendo de la variedad, un cafeto tarda entre tres y cuatro años en producir. Existen distintas variedades de café y sus granos poseen características diferentes, ver figura 3. Entre sus particularidades están el tamaño, el sabor y la resistencia a las enfermedades varían (Gallego et al., 2023).

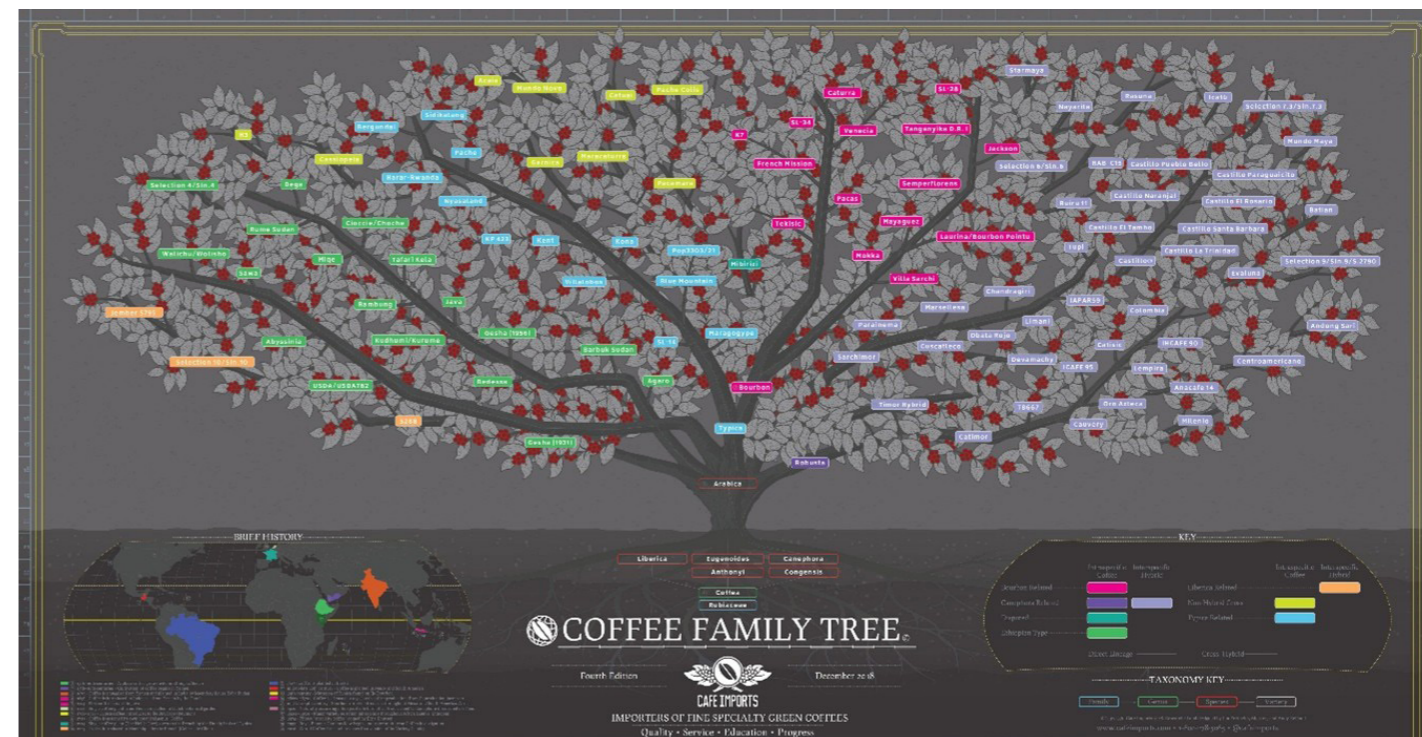


Figura 3. Árbol genealógico del Café: Especies y Variedades. (CAFÉ IMPORTS, 2018)

2.5. Determinación de la madurez de cosecha

Para determinar el estado de maduración del fruto, se presenta un método que integra la observación del color del fruto, la medición de sólidos solubles (°Brix) y la extracción de una pequeña cantidad de mucílago del fruto. Este método permite al caficultor decidir el momento para iniciar la cosecha. El método es descrito a continuación. Se seleccionan 40 árboles de café al azar, distribuidos uniformemente dentro del sistema de cultivo. Visualmente cada planta se segmenta en tres estratos (bajo, medio y alto), luego se selecciona una rama productiva ubicada en la parte

media de planta, de donde se extraen 3 frutos al azar. Los 120 frutos obtenidos se clasifican en los niveles de maduración según la tabla 1. Luego, por cada nivel de maduración, se toman cinco frutos y se mide la concentración de sólidos solubles y la cantidad de gotas de mucílago que se extrae (Osorio et al., 2023).

Para obtener una infusión de alta calidad, la cosecha debe realizarse cuando las cerezas están completamente rojas. Una minuciosa selección de los frutos, es parte del secreto de los mejores cafés (Coradi et al., 2008). Ver figura 4.

Estado de Maduración del fruto	Color	Sólidos solubles (°Brix)	Número de gotas	Característica
Nivel 1 (inmaduro)	Verde	<6.0	0	---
Nivel 2 (Pintón)	Verde amarillo naranja	6.0 a 17.0	<2	Amargo y astringente
Nivel 3 (Maduro)	Rojo intenso	17.0 a 20.0	3	Taza limpia
Nivel 4 (Sobremaduro)	Guinda o morado	>20.0	<2	Mala calidad
Nivel 5 (Seco)	Aminoglucósidos	>20.0	0	---

Tabla 1. Parámetros para determinar la maduración del fruto de café. (Peñuela-Martínez et al., 2022)

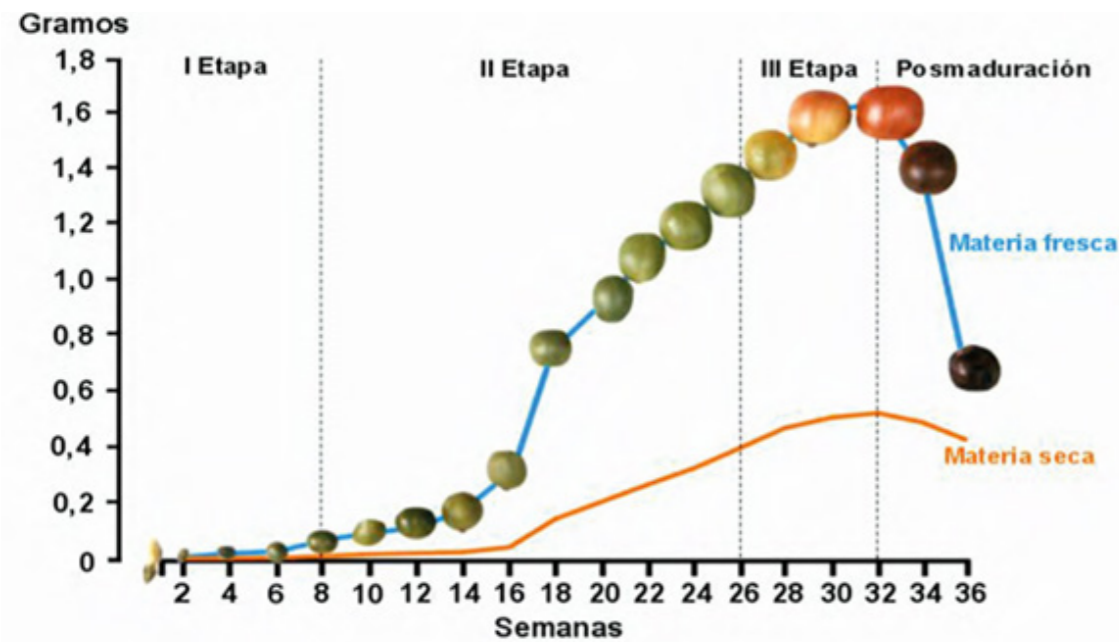


Figura 4. Etapas de maduración de los frutos del café. (Salazar et al., 1993; Morales&Bolaños, 2023)

2.6. Métodos de procesamiento

Existen tres grandes métodos de procesamiento: lavado, honey y natural. El lavado implica el uso intensivo de agua para remover la pulpa y el mucílago (Specialty Coffee Association, 2019). El honey combina elementos de ambos procesos, dejando parte del mucílago durante el secado (Perfect Daily Grind, 2021). El natural, objeto de este estudio, consiste en secar la cereza completa, lo que genera perfiles aromáticos únicos y reduce el consumo hídrico (Coffee Sapiens, 2022; Barista Institute, 2020). Nuevas investigaciones han propuesto variantes híbridas que buscan optimizar la calidad sensorial y la sostenibilidad (Ferreira et al., 2021).

3

PRODUCCIÓN DE CAFÉS NATURALES

La producción natural requiere condiciones climáticas específicas: humedad relativa baja y radiación solar constante (Borém, 2013). En Brasil y Etiopía, este método se ha perfeccionado con infraestructura de patios de secado y camas africanas (Torres, 2019), ver figura 5. En México, se han desarrollado innovaciones como el secado solar

controlado (Hernández, 2020). El proceso puede durar entre 15 y 30 días, dependiendo de las condiciones ambientales (Pérez, 2018). Investigaciones recientes han mostrado que la aplicación de tecnologías de monitoreo digital puede mejorar la consistencia del secado (González et al., 2021).



Figura 5. A) camas africanas para secado al sol (Jorge, 2024) y B) zarandas en campo en la Sierra Nororiental de Puebla (imagen de propia).

3.1. Características de los cafés naturales

Los cafés naturales se distinguen por notas afrutadas, vinosas y dulces (Davids, 2019; López, 2021). Su perfil sensorial es más complejo que el de los lavados, aunque también más variable. Estudios han demostrado que la transferencia de compuestos desde la pulpa hacia la semilla durante el secado contribuye a la intensidad aromática (Ribeiro et al., 2017; Silva, 2019). Además, se ha observado que los cafés naturales presentan mayor concentración de azúcares reductores y ácidos orgánicos (Bastista et al., 2019; Worku et al., 2018).

3.2. Fermentación

Durante el secado de las cerezas en el proceso natural, ocurre una fermentación espontánea debido a la acción de levaduras y bacterias presentes en la cereza y el ambiente. Esta fermentación contribuye a la formación de ésteres y alcoholes que enriquecen el perfil sensorial del café.

3.3. Microorganismos involucrados

La fermentación natural está mediada por levaduras y bacterias lácticas que metabolizan azúcares y producen compuestos volátiles (Schwan & Fleet, 2015; Silva et al., 2008). Entre las especies más relevantes se encuentran *Saccharomyces cerevisiae* y *Lactobacillus plantarum* (Batista et al., 2019). Estas comunidades microbianas

influyen directamente en la calidad sensorial y en la estabilidad del grano (Lee et al., 2015; Pereira et al., 2020). Investigaciones recientes han identificado también la participación de bacterias acéticas en la producción de notas afrutadas (De Bruyn et al., 2017).

3.4. Café natural y sostenibilidad

El proceso natural requiere significativamente menos agua que el lavado. Mientras que el lavado puede consumir entre 40 y 60 litros de agua por kilogramo de café pergamino, el natural reduce este consumo casi a cero (FAO, 2020; ICO, 2018). Esto convierte al método natural en una alternativa sostenible, especialmente en regiones con estrés hídrico (Läderach et al., 2017; Martínez, 2022). Sin embargo, el secado prolongado implica mayor riesgo de contaminación si no se controla adecuadamente (Sanz-Urbe & Velásquez-Henao, 2022). El secado en el proceso del café es la etapa más cara del beneficiado húmedo, representando alrededor del 90% del costo de producción (Mendieta, 2011). Estudios de ciclo de vida han confirmado que el café natural tiene menor huella hídrica y energética (Mori et al., 2020).

3.5. Perfil aromático y sensorial

El proceso natural requiere significativamente menos agua que el lavado. Mientras que el lavado puede consumir entre 40 y 60 litros de agua por kilogramo de café pergamino, el natural reduce este consumo casi a cero (FAO, 2020; ICO, 2018). Esto convierte al método natural en una alternativa sostenible, especialmente en

4 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El café natural no es solo una forma distinta de preparar la bebida más popular del mundo, sino una evidente oportunidad de acceso a procesos biológicos, sociales y ambientales profundamente conectados. La producción de cafés naturales representa un vínculo entre tradición y ciencia. Su estudio involucra disciplinas como microbiología, química de alimentos y sostenibilidad ambiental. Es un producto digno de estudio y de consumo consciente, nos invita a concientizar nuestra relación con los alimentos y el medio ambiente. En un mundo cada vez más afectado por el cambio climático, cada sorbo de café puede ser también un pequeño acto de ciencia, cultura y sostenibilidad.

Resulta inspirador observar cómo un método ancestral se convierte en objeto de investigación avanzada, con implicaciones directas en la economía, la cultura y el medio ambiente. El futuro del café natural dependerá de la capacidad de integrar innovación tecnológica con prácticas tradicionales, garantizando calidad y sostenibilidad.



REFERENCIAS

Barista Institute. (2020). Natural vs washed coffees. Recuperado de <https://www.baristainstitute.com>

Batista, N. N., et al. (2019). Yeast role in coffee fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1028.

Borém, F. M. (2013). Post-harvest processing of coffee. Lavras: UFLA Press.

Bressani, R. (2001). Nutritional aspects of coffee. *Food and Nutrition Bulletin*, 22(2), 123-130.

Coffee Sapiens. (2022). Proceso natural: El arte de transformar el café sin agua. Recuperado de <https://www.coffeesapiens.org>

Coradi, P. C., Borém, F. M., & Oliveira, J. A. (2008). Qualidade do café natural e despolpado após diferentes tipos de secagem e armazenamento 1. In *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v (Vol. 12, Issue 2)*.

Davids, K. (2019). Coffee roasting: Best practices. Coffee Publishing.

De Bruyn, F., et al. (2017). Acetic acid bacteria in coffee fermentation. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(14), e02748-16.

dos Santos Gomes, W., Pereira, L. L., Rodrigues da Luz, J. M., Soares da Silva, M. de C., Reis Veloso, T. G., & Partelli, F. L. (2024). Exploring the microbiome of coffee plants: Implications for coffee quality and production. In *Food Research International (Vol. 179)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.113972>

Ferreira, A. D., et al. (2021). Hybrid processing methods in specialty coffee. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15432.

Food and Agriculture Organization. (2020). Coffee production and sustainability. Roma: FAO.

Gallego, C. P., Imbachí, L. C., & Osorio, V. (2023). Influencia del proceso de secado del café natural en las características físicas del grano y la calidad sensorial. *Revista Cenicafe*, 74(1), e74107. <https://doi.org/10.38141/10778/74107>

González, J. A., et al. (2021). Digital monitoring in coffee drying. *Agricultural Technology Review*, 12(3), 45-59.

Hernández, R. (2020). Innovaciones en secado solar de café. Puebla: Universidad Autónoma de Puebla.

International Coffee Organization. (2018). Coffee market report. Londres: ICO.

International Coffee Organization. (2021). Annual report. Londres: ICO.

Läderach, P., et al. (2017). Climate change and coffee production. *Climatic Change Journal*, 145(1-2), 47-59.

Lee, L. W., et al. (2015). Coffee fermentation and flavor development. *Food Chemistry*, 185, 182-191.

López, M. (2021). Café de especialidad en América Latina. Bogotá: Editorial Kairós.

Martínez, A. (2022). Impacto ambiental de los procesos de café. Ciudad de México: UNAM.

Morales Reyes, E. I., & Bolaños González, M. A. (2023). Manual de Manejo Poscosecha y Fermentaciones del Fruto del Café.

Mori, F., et al. (2020). Life cycle assessment of coffee processing. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120-135.

Osorio, V., Pabón, J., & Gallego, C. P. (2023). Calidad del café a partir de frutos con diferentes estados de madurez. *Avances Técnicos Cenicafe*, 556, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0556>

Osorio, V., Pabón, J., Gallego, C. P., & Echeverri, L. F. (2021). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la composición química del café. *Revista Cenicafe*, 72(1), e72103. <https://doi.org/10.38141/10778/72103>

Pendergrast, M. (2010). *Uncommon grounds: The history of coffee and how it transformed our world*. Basic Books.

Peñuela, A. E., & Sanz-Urbe, J. R. (2021). Obtenga café de calidad en el proceso de beneficio. In *Guía más agronomía, más productividad, más calidad (pp. 189-218)*. Cenicafe. https://doi.org/10.38141/10791/0014_11

Pereira, L. L., et al. (2020). Impact of drying methods on coffee quality. *Food Research International*, 137, 109-118.

Pérez, J. (2018). *Procesos de beneficio del café en México*. México: Editorial Trillas.

Perfect Daily Grind. (2021). Natural coffee processing explained. Recuperado de <https://www.perfectdailygrind.com>

Pires, J. F., Viana, D. C., Braga, R. A., Schwan, R. F., & Silva, C. F. (2021). Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. *Journal of Environmental Management*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111541>

Ribeiro, L. S., et al. (2017). Coffee microbiota and sensory profile. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(6), 2511-2521.

Samper, L. F. (2019). *Café de Colombia: Historia y ciencia*. Bogotá: Editorial Planeta.

Sanz-Urbe, J. R., & Velásquez-Henao, J. (2022). Producción de café con fermentaciones incompletas y prolongadas. *Revista Cenicafe*, 73(1), e73105.

Schwan, R. F., & Fleet, G. H. (2015). *Coffee fermentation and flavor*. CRC Press.

Silva, C. F. (2019). *Coffee fermentation handbook*. Belo Horizonte: Coffee Science Press.

Silva, C. F., et al. (2008). Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (Coffea arabica) fermentation. *Food Microbiology*, 25(2), 285-291.

Specialty Coffee Association. (2019). Processing methods and cup quality. Recuperado de <https://sca.coffee>

Torres, G. (2019). Fermentación controlada en cafés naturales. Medellín: Editorial EAFIT.

Worku, M., et al. (2018). Genetic diversity and quality traits in coffee. *Plant Science Journal*, 270, 30-40.

Zaman, S., & Shan, Z. (2024). Literature Review of Proteomics Approach Associated with Coffee. In *Foods (Vol. 13, Issue 11)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods13111670>

Freitas, V. V., et al. (2024). Coffee: A comprehensive overview of origin, market, and the quality process. *Trends In Food Science & Technology*, 146, 104411. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104411>

Mendieta, J. F. (2011). *Secado de café (Coffea arabica) en tres modelos de secadores solares tipo invernadero con estructura de bambú [Tesis de maestría]*. Colegio de Postgraduados- campus Córdoba.

Ofertas de Servicios Tecnológicos Especializados



Control Ambiental

- Análisis de aguas residuales. (DBO, DQO, SST, turbiedad, pH, grasas, metales, cianuros, etc.)
- Análisis de contaminantes en suelos.
- Determinación de nitrógeno total en plantas.

Industria Alimentaria

- Elaboración de tabla nutrimental.
- Análisis proximales.
- Análisis microbiológicos.

Industria Agrícola

- Cultivo in vitro e hidropónico.
- Identificación y control de plagas.
- Análisis de suelos.
- Determinación de contaminantes en agua y suelo.
- Desarrollo de biofertilizantes.

Estrategia Empresarial

- Análisis de factibilidad técnico - económica de proyectos de inversión de base tecnológica.

Biología Molecular

- Identificación molecular de variedades de plantas.
- Identificación molecular de hongos, algas y bacterias por 16s.
- Identificación de cepas BAL.

Industria de Procesos Bioquímicos

- Análisis elemental (CHON-SI).
- Análisis y diseño de bioprocesos.
- Aplicaciones específicas de secado y extracción sólido líquido.
- Análisis y determinación de compuestos por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) y cromatografía de gases (CG).
- Análisis electroforético de proteínas y por cromatografía de líquidos (FPLC).
- Extracción y purificación de proteínas por cromatografía.

Industria de Materiales (Nanobiotecnología)

- Análisis por espectroscopia
- FTIR
- UV-VISIBLE
- RAMAN



Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México. C.P. 90700



Red IPN: (+52) 55 57 29 6000, Ext. 87816.



direccionciba@ipn.mx

La tecnología para el cultivo de plantas: Sistemas de inmersión temporal

Marco Antonio Morales-Caporal¹,
Daniela Taxis-Rodríguez¹, Lilia Sánchez-Minutti¹

¹ Laboratorio de Procesos Biotecnológicos. Universidad Politécnica de Tlaxcala. Av. Universidad Politécnica de Tlaxcala No.1, San Pedro Xalcaltzinco, Tepeyanco 90180, Tlaxcala, México.

Autor de correspondencia: lilia.sanchez@uptlax.edu.mx

RESUMEN

La micropropagación de tejidos vegetales utilizando medios semi sólidos representa una alternativa para la producción de material vegetal libre de patógenos, sin embargo, presenta algunas desventajas como el costo por los agentes gelificantes, una limitada aireación y restricciones en la automatización y escalamiento del proceso. Una alternativa a estas problemáticas es el uso los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT). En estos sistemas, el material vegetal se cultiva dentro de contenedores y durante intervalos de tiempo programados el material vegetal se encuentra en contacto directo con el medio de cultivo y en los periodos donde no existe inmersión permanecen expuestos al aire, lo que favorece el intercambio gaseoso y ayudando a reducir la hiperhidricidad, que se hace evidente cuando el material vegetal se encuentra en contacto continuo con un medio líquido. En esta revisión bibliográfica se expone el diseño y funcionamiento de los SIT, según el tipo de contenedor o mecanismo de movimiento que emplean. Se describen los sistemas de frascos gemelos, de un solo contenedor y los basados en cambio de posición. Aunado a esto, se expresan las condiciones generales de operación y las ventajas y limitaciones que presentan. La información presentada busca proporcionar una visión general que permita comprender el funcionamiento de estos sistemas y que facilite la toma de decisiones para su selección y aplicación.

Palabras clave: Inmersión temporal, cultivo *in vitro*, Biorreactor



ABSTRACT

Micropropagation of plant tissues using semi-solid media represents an alternative for the production of pathogen-free plant material. However, it presents some disadvantages, such as the cost of gelling agents, limited aeration, and restrictions on process automation and scalability. An alternative to these problems is the use of Temporary Immersion Systems (TIS). In these systems, the plant material is grown inside containers and during programmed time intervals the plant material is in direct contact with the culture medium and in the periods where there is no immersion they remain exposed to the air, which favors gas exchange and helps to reduce hyperhydricity, which becomes evident when the plant material is in continuous contact with a liquid medium. This literature review describes the design and operation of TIS, according to the type of container or movement mechanism they employ. Twin-flask systems, single-container systems, and those based on position change are described. In addition, the general operating conditions, advantages, and limitations of these systems are discussed. The information presented aims to provide an overview that allows understanding of how these systems work and facilitates decision-making for their selection and application.

Keywords: Temporary immersion, *in vitro* culture, bioreactor

INTRODUCCIÓN

El cultivo de tejidos vegetales se ha apoyado de la técnica de micropropagación para la obtención y multiplicación de explantes. En la micropropagación, se produce un cultivo aséptico en recipientes con un medio de cultivo definido y en condiciones ambientales controladas (Kumar & Reddy, 2011). Las etapas que involucra este tipo de cultivo son: 0) obtención del material vegetal: aquí se seleccionan plantas vigorosas, viables y libres de enfermedades; 1) establecimiento del cultivo: se realiza una escisión de la planta seleccionada y su esterilización superficial. El explante inicial se establece en un cultivo a base de agar o medio de cultivo líquido, resultando en la activación del tejido vegetal y su multiplicación. La relativa escasez de explantes primarios y su tamaño hacen de esta etapa la más rentable y eficiente para la selección de material vegetal. 2) multiplicación: los explantes primarios seleccionados se transfieren asépticamente mediante varios subcultivos a nuevos medios de cultivo que favorecen la proliferación de propágulos clonales. 3) elongación y enraizamiento de las plántulas: tras repetidos subcultivos y análisis para detectar contaminación microbiana, las plántulas son cultivadas para detener la rápida multiplicación e iniciar el establecimiento de una planta completamente desarrollada (elongación del tallo, formación de raíces, estimulación de la fotosíntesis, función estomática...etc.). Estos cambios fisiológicos se logran mediante modificaciones en la composición de los medios de cultivo y condiciones ambientales. 4) aclimatación: las plantas son preparadas para ser cultivadas *ex vitro*, se modifican las condiciones ambientales, se agregan hormonas de enraizamiento, se promueve la formación de ceras cuticulares para aumentar la actividad fotosintética, la temperatura y humedad se regulan para ajustarse al entorno de un invernadero (Loberant & Altman, 2010).

Entre las ventajas de la micropropagación destacan la obtención de un gran número de plantas libres de patógenos en poco tiempo y con alta uniformidad (Kumar & Reddy, 2011), aunado a que se eliminan los factores geográficos y de clima que influyen los cultivos tradicionales. Entre las desventajas que presenta este tipo de cultivo destacan el uso frecuente de medios semi sólidos, los cuales son costosos y se requiere constante mano de obra, aunado a que el estado semi sólido del medio limita la posibilidad de automatización y se observa una mayor incidencia de anomalías como la hiperhidricidad, debido a su influencia en la absorción de agua y la transpiración de las plantas (Ivanova & Van Staden, 2011; Quiala et al., 2012) y en consecuencia, se ve limitado su escalamiento. Una alternativa a estas problemáticas son el uso de biorreactores y medios líquidos, estos pueden aumentar la tasa de multiplicación, automatizar el proceso y reducir la mano de obra (Roels et al., 2006).

Entre los biorreactores desarrollados para estos propósitos se encuentran los Sistemas de Inmersión Temporal (SIT). En los SIT, el tejido vegetal o explantes se sumerge periódicamente en un medio nutritivo y luego se drena la solución nutritiva para permitir que el tejido vegetal acceda al aire (Afreeen, 2008), esto es: permanecen fuera del medio de cultivo por ciertos periodos de tiempo. En estos sistemas, el tiempo de inmersión de la planta, el volumen del medio y volumen del recipiente son claves para lograr el máximo crecimiento de los explantes. Aunado a esto, dado que las condiciones de crecimiento son controladas, los SIT resultan útiles para la investigación científica dado que permite la reproducibilidad de los experimentos, uso eficiente del espacio y en algunos casos ha servido para la conservación de germoplasma. A gran escala se pueden utilizar para embriones somáticos de tamaño pequeño, el crecimiento de bulbos, cormos, microtubérculos, cultivos de brotes compactos, etc. (Afreeen, 2008). Se ha reportado que también se

pueden reducir los costos de mano de obra, contenedores y agar en un 40% (Baltazar-Bernal & Mora-González 2024). Los nuevos sistemas de cultivo de plantas responden a la necesidad de propagar, mantener y conservar las especies y permiten optimizar el uso de los recursos necesarios para su crecimiento, así como satisfacer la demanda de mercado de plantas. En este documento se describe el funcionamiento de los SIT y algunos cultivos donde han sido utilizados.

2 CLASIFICACIÓN DE LOS SIT

Los SIT se clasifican en biorreactores de: frascos gemelos, de un solo contenedor y los basados en un el cambio de posición. A continuación, se brinda una descripción de estos sistemas:

2.1 Biorreactores de frascos gemelos

Constan de dos recipientes: uno llamado cámara con el cultivo vegetal y otro llamado cámara de almacenamiento del medio de cultivo. Estas cámaras están conectadas ya sea en la base o por su parte superior por mangueras flexibles y esterilizables. En los biorreactores conectados por la base, el medio de cultivo pasa de la cámara de medio de cultivo a la cámara de cultivo vegetal por medio del ingreso de aire estéril a baja presión; sin embargo, cuando están conectados por la parte inferior se requiere aire presurizado (Mirzabe et al., 2022). El aire es suministrado por bombas o por un compresor con una sobrepresión de 0.5 bar (Ducos et al., 2007) y el flujo es controlado por un temporizador y una válvula solenoide (0.8-1 L/min). Los frascos pueden ser de plástico esterilizable o vidrio. El volumen de medio de cultivo depende del tipo de planta cultivada y el tamaño de las cámaras, se ha documentado el uso de 25 mL hasta 5 L de medio de cultivo (Mirzabe et al., 2022). Entre los biorreactores

de frascos gemelos se encuentran los biorreactores de flujo y reflujo y el Biorreactor de Inmersión Temporal (Fig 1).

a) Los biorreactores de flujo y reflujo se caracterizan porque la cámara de cultivo vegetal y la de medio de cultivo están unidas por la base por medio de mangueras, la cámara de cultivo vegetal está por encima de la cámara de medio (Mirzabe et al., 2022) y el medio de cultivo pasa a intervalos de tiempo definidos de una cámara a otra. Estos biorreactores son de fácil construcción, automatización y utilizan poca energía (Georgiev et al., 2014). En este sistema, se han evaluado el cultivo de *Agave Tobala* (*Agave potatorum*) con tiempos de inmersión de 2 min por 4, 6, 12 y 15 h y 20 explantes por biorreactor y se han reportaron buenos rangos de multiplicación de plantas, aunque los brotes pueden presentar longitudes más cortas e hiperhidricidad si no se establecen adecuadamente los tiempos de



inmersión (Correa-Hernández et al., 2022). En el cultivo de manzana, se han probado tiempos de inmersión 15 min cada 24 h y 1 L de medio de cultivo (Chakrabarty et al., 2007) y en la planta *Anthurium andraeanum* se han evaluado tiempos de inmersión de 2 min cada 4,8 y 24 h con 500 mL de medio de cultivo (Martínez-Estrada et al., 2019). El escalamiento del cultivo de plantas en este tipo de biorreactores es un reto para la optimización tecnológica, sin embargo, ya se han descrito protocolos de propagación de orquídeas a pequeña escala (Baltazar-Bernal & Mora-González 2024). Algunas estrategias como la aplicación de fitohormonas después del cultivo vegetal para mejorar el enraizamiento resultarían útiles en aplicaciones como la reforestación de poblaciones silvestres y para la plantación de especies comerciales para la industria del mezcal (Correa-Hernández et al., 2022).

b) El Biorreactor de Inmersión Temporal (BIT) es un sistema cuyas cámaras de cultivo vegetal y de medio de cultivo están unidas por la parte superior por medio de una manguera, la cual sirve para transportar el medio de cultivo entre ellas y dejar expuestos los explantes al aire. El BIT permite un control de la esterilidad por largos periodos de tiempo, aunque no cuentan con un sistema de renovación del medio de cultivo ni ventilación forzada y no cuentan con un puerto externo para el CO₂ (Georgiev et al., 2014). En el cultivo de kiwi se ha reportado que el uso del BIT favorece la multiplicación de hojas y brotes gracias a la oxigenación periódica que brinda este biorreactor, aunque pueden presentar menor eficiencia en los procesos de aclimatación; estas plantas se ha introducción con éxito en Ixhuatlán del Café, Veracruz, México, lo que demuestra el potencial de las técnicas *in vitro* (López-Páez et al., 2025). También se ha utilizado este biorreactor para el cultivo de gerberas con tiempos de inmersión de 3 min cada 6 h y 250 mL de medio de cultivo (Mosqueda Fròmeta et al., 2017) y en *Stevia rebaudiana* se han utilizado 250 mL de medio de cultivo y tiempos de inmersión de 5 min cada 0.5, 0.75, 1, 2, 3 h y 7 min (Phuc et al., 2017).

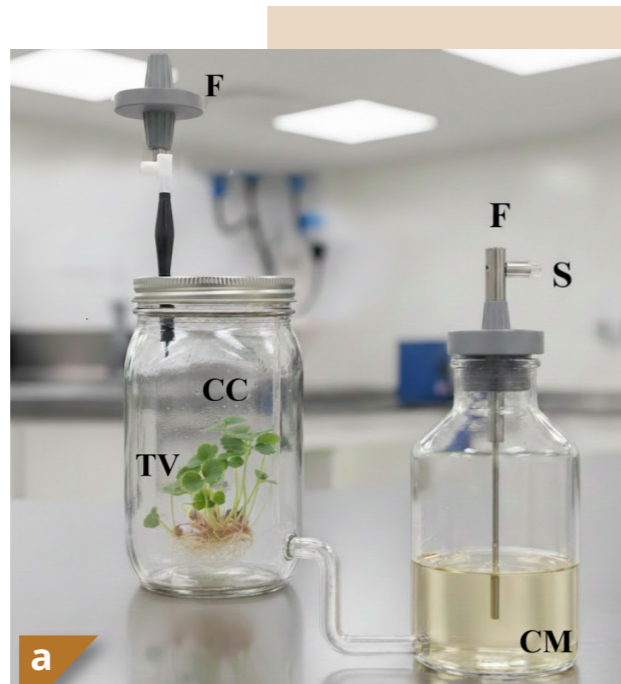


Figura 1. Biorreactores de frascos gemelos. a) De flujo y reflujo y b) Biorreactor de Inmersión Temporal. CC: cámara de cultivo, CM: cámara de medio de cultivo, F: filtro, E: entrada de aire, S: salida de aire y TV: tejido vegetal.

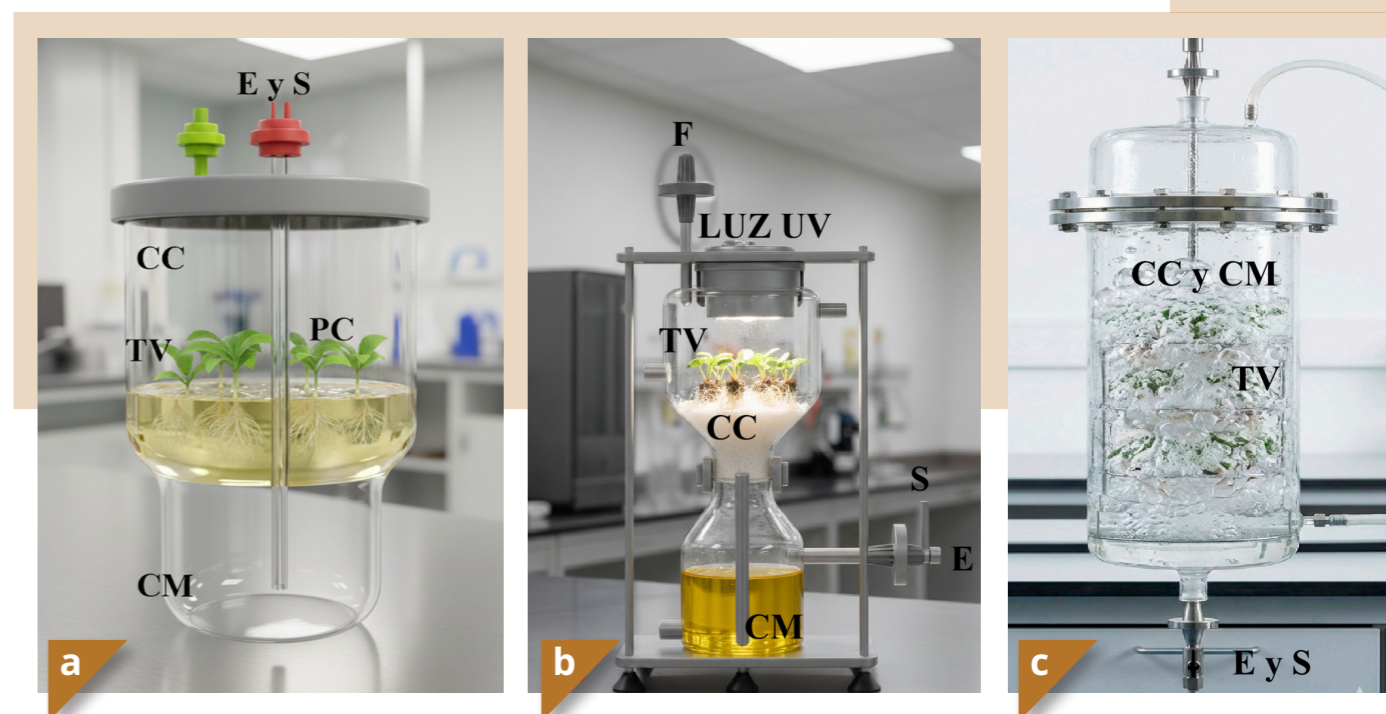
2.2 Biorreactores de un solo contenedor

Estos biorreactores presentan integradas la cámara de cultivo vegetal y la de medio de cultivo en un solo recipiente, donde la primera está en la parte superior y la segunda en la parte inferior. El medio de cultivo puede moverse ya sea por medio de soportes mediante un cilindro neumático o por el ingreso de aire a través de un tubo y filtro (Mirzabe et al., 2022). Ejemplos de estos biorreactores son el Recipiente Automatizado de Inmersión Temporal (RITA), el termofotobiorreactor y el Biorreactor de Inmersión por Burbujas (BIB), (Fig 2).

a) El RITA utiliza un recipiente de polipropileno donde las plantas están separadas por una malla de la cámara de medio de cultivo y por un puerto central ingresa aire que mueve el medio de cultivo hacia la parte superior del biorreactor, impregnando los tejidos vegetales con el líquido. El flujo de aire es suministrado por un compresor a sobrepresión inferior de 0.2 bar y el flujo de aire a través de cada recipiente debe ser controlado (0.8 a 1 L/min) mediante una válvula para reducir la velocidad de burbujeo cuando las plantas están sumergidas (Vitropic, 2018). El volumen de medio de cultivo regularmente está en el rango

de 100-300 mL (Mirzabe et al., 2022). Este biorreactor es fácil de operar y brinda suficiente humedad relativa al cultivo (Georgiev et al., 2014), además de presentar la ventaja de reducir la incidencia de hiperhidricidad en algunos cultivos como el de pistacho (la hiperhidricidad es la acumulación de agua que provoca hinchazón de los tejidos y se observa cuando se cultivan explantes que están en contacto permanente con el medio de cultivo). En el pistacho, se han evaluado tiempos de inmersión de 16 min cada 8, 12 y 24 h con 200 mL de medio de cultivo y un fotoperiodo de 16 h bajo luz blanca fría (Akdemir et al., 2014). En cultivo de papa se ha evaluado el tiempo de inmersión de 4 min cada 3 h con 750 mL de medio de cultivo y se reportó el excelente potencial del biorreactor para la producción comercial de microtubérculos (yFiguroa et al., 2021). En plantas de café con tiempos de inmersión de 3 min cada 6 h se reportó una producción de embriones 1.65 veces más rápida que el cultivo convencional (Mwaniki, 2021). En el cultivo de *Laelia speciosa* se reportó la producción de flavonoides, polifenoles y actividad antioxidante al someter las plantas a una inmersión de un minuto cada 8 h (López-Escamilla et al., 2024).

Figura 2. Biorreactores de un solo contenedor. a) Recipiente Automatizado de Inmersión, b) Termofotobiorreactor y c) Biorreactor de Inmersión por Burbujas. CC: cámara de cultivo, CM: cámara de medio de cultivo, F: filtro, E: entrada de aire, S: salida de aire, TV: tejido vegetal y PC: puerto central.



b) El termofotobiorreactor contiene en su parte inferior una doble pared que forma una camisa de agua para controlar la temperatura y en la parte superior una lámpara de luz UV (Mirzabe et al., 2022), fue diseñado para el cultivo de plantas extremófilas y resulta de fácil automatización, sin embargo, su principal desventaja es su compleja construcción y costo (Georgiev et al., 2014). El suministro de aire se realiza con un compresor y el volumen máximo del recipiente es de 1500 mL. Este biorreactor fue diseñado exclusivamente para el cultivo de *Deschampsia antarctica*, una especie de pasto de la Antártida caracterizado por su capacidad de autopolinización y ha sido patentado en los Estados Unidos (Navarro et al., 2013).

c) El BIB consta de un recipiente donde los explantes se encuentran en la parte superior y el aire es ingresado por la parte inferior de la cámara de cultivo vegetal. Los explantes son sumergidos en espuma, la cual se origina por aireamiento del medio de cultivo que contiene Tween 20 (Mirzabe et al., 2022; Scheidt et al., 2009). En este biorreactor se suministra aire con un compresor a baja presión (0.5 bar) y el volumen del medio de cultivo depende del tamaño de las cámaras de cultivo. En estos biorreactores, el drenado y el detergente puede limitar el crecimiento de plantas sensibles. En plantas del árbol de té se han utilizado 200 mL de medio de cultivo con 1 gota de Tween 20 y luz blanca ($32 \mu\text{M m}^{-2} \text{s}^{-1}$), se ha observado la ausencia de hiperhidricidad y excelentes resultados en la producción de biomasa: masa fresca total y brotes, asociados a un mayor espacio interno del biorreactor (Scheidt et al., 2011). El biorreactor puede resultar prometedor para producción de especies ornamentales, permitiendo una buena nutrición, luminosidad y homogeneización del aire y consecuentemente una mejor productividad (Scheidt et al., 2009).

2.3 Biorreactores basados en el cambio de posición

Estos biorreactores pueden contener uno o más recipientes y la inmersión de las plantas en el medio de cultivo se logra gracias al movimiento del recipiente por diversas fuerzas por lo que ya no es necesario el uso de bombas y/o tuberías. Entre estos biorreactores se encuentran el de balancín, BioMint y el de tambor giratorio (Fig 3).

a) El biorreactor en balancín utiliza dos recipientes rectangulares, en cada uno de ellos están los explantes y el medio de cultivo juntos y son balanceados por medio de estantes inclinados (Mirzabe et al., 2022), esto significa que la cámara de cultivo vegetal y la de medio de cultivo comparten el mismo espacio físico. El medio de cultivo se desplaza lentamente, por lo cual no necesitan conexiones ni bombas para recircularse. En estos sistemas es necesario una inclinación adecuada de la cámara de cultivo vegetal y el medio no puede ser renovado, su principal ventaja radica en

que se pueden colocar múltiples cajas sin necesidad de un sistema de aireación (Georgiev et al., 2014). Un punto crítico en estos biorreactores es el volumen del medio de cultivo, dado que un exceso o una mala inclinación del recipiente puede evitar la intermitencia en la inmersión. Frecuentemente se utilizan entre 50 y 100 mL de medio de cultivo (Mirzabe et al., 2022). Los biorreactores en balancín se han usado en el cultivo de avellana híbrida y se ha reportado un buen enraizamiento de los explantes y una mayor tasa de supervivencia durante la aclimatación y el trasplante a campo (Nicholson et al., 2020). En el cultivo de café se ha reportado un eficiente proceso de multiplicación por esquejes y un buen enraizamiento de las plantas cuando se usaron 50 mL de medio de cultivo con tiempos de inmersión de 7 s cada 32 s (Valdés et al., 2021). En el cultivo de *Curcuma longa* L. se han reportado resultados satisfactorios cuando se utilizan 200 mL de medio de cultivo, luces fluorescentes blancas ($30 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y una rotación por minuto (El-Hawaz et al., 2015).

b) El biorreactor BioMint es parecido al de balancín; sin embargo, los recipientes son cilíndricos y los explantes están separados del medio de cultivo por una placa perforada que permite el flujo del medio y la ventilación forzada (Mirza-

be et al., 2022). En este biorreactor los explantes pueden estar separados de la cámara de medio de cultivo completamente y se puede enriquecer la cámara de cultivo vegetal con CO_2 (Georgiev et al., 2014). Estos biorreactores son de fácil construcción y se puede diseñar con sistemas complejos de plataformas accionadas por motores eléctricos o sustituirlos por sistemas neumáticos (Sereda, 2024). El volumen de medio de cultivo utilizado puede ir en rangos de 200 – 500 mL (Mirzabe et al., 2022). En el cultivo de caña de azúcar con 400 mL y un tiempo de inmersión de 4 min cada hora se ha reportado un porcentaje de supervivencia, peso seco y coeficiente de multiplicación superior que cuando se utilizan otros volúmenes de medio de cultivo (Daniels et al., 2018).

c) El biorreactor de tambor giratorio contiene el medio de cultivo y los explantes en una botella, la cual contiene un soporte para las plantas y es agitado por medio de un sistema de rodillos (Mirzabe et al., 2022). El soporte puede ser de acero inoxidable o espuma de poliuretano y tiene la función de retener los explantes en cada giro, evitando el contacto permanente con el medio de cultivo. Es un sistema simple, sin embargo, requiere de un alto esfuerzo cortante y no tiene ventilación forzada (Mirzabe et al., 2022). El volumen del medio de cultivo a utilizarse depende del tipo de planta y del tamaño de la botella. Este tipo de biorreactor se ha utilizado para el cultivo de microtúbulos de papa con un volumen de medio de cultivo de 200 mL y una rotación de 1 rpm y se observó el incremento de tubérculos en comparación con un sistema sin agitación (Akita y Ohta 1998). En el cultivo de estevia se evaluaron volúmenes de 25, 50 y 100 mL de medio de cultivo y una velocidad de rotación de los discos de 1.5 – 4.0 x g y se observó que el crecimiento de las raíces depende del volumen y la densidad del inóculo (Reis et al., 2011).

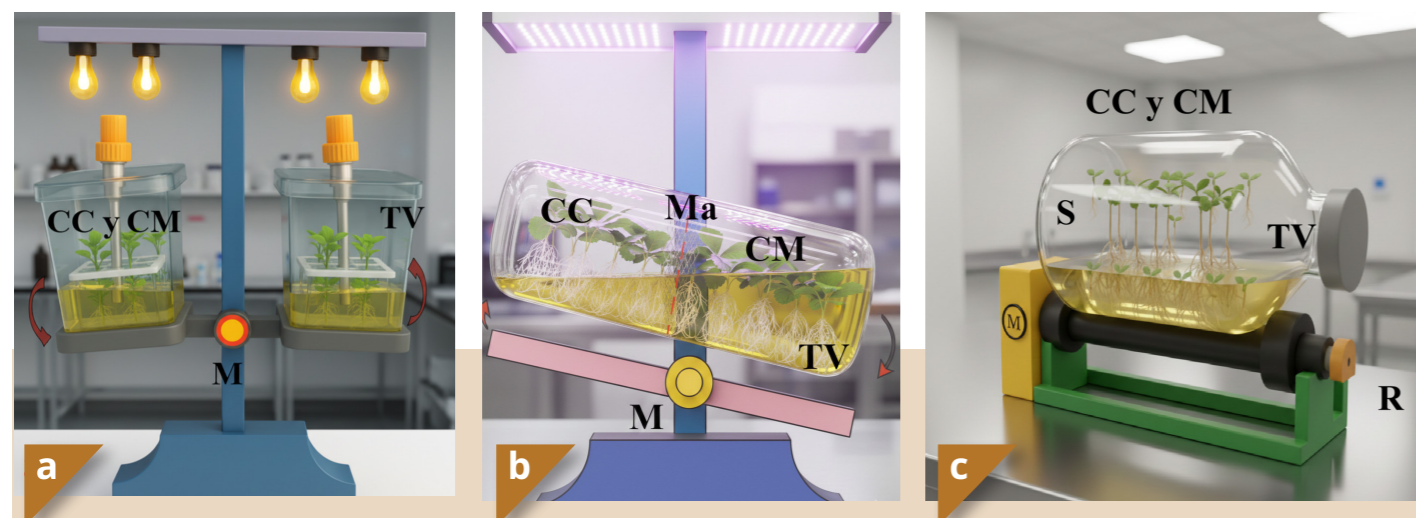


Figura 3. Biorreactores basados en el cambio de posición. a) En balancín, b) BioMint y c) Tambor giratorio. CC: cámara de cultivo, CM: cámara de medio de cultivo, TV: tejido vegetal, M: motor, Ma: Malla y R: rodillo.

3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SIT

El desarrollo de la micropropagación del medio semi sólido al medio líquido y su aplicación en biorreactores ha contribuido a reducir algunas problemáticas relacionadas con los costos y fenómenos no deseados en el cultivo de plantas. De acuerdo con Afreen (2008), las principales ventajas de un SIT son: a) la reducción de la hiperhidricidad, en comparación con la inmersión permanente que una planta tiene al someterse a un medio líquido, b) el control en el crecimiento y el desarrollo de las plantas debido a la modificación de la frecuencia y duración de la inmersión y c) el bajo estrés mecánico en los tejidos vegetales debido a la ausencia de agitación o aireación.

Aunque los SIT pueden presentar ventajas sobre los cultivos líquidos y semi sólidos, estas dependen más bien de tipo de planta, las condiciones



de operación del SIT y la composición química del medio de cultivo. Por ejemplo: en el cultivo de *A. potatorum* en un biorreactor de flujo y reflujo, la hiperhidricidad en medio semi sólido fue del 12%, mientras que en el SIT fue del 58%; sin embargo, aumentó el número de brotes por explante hasta casi cinco veces más (Correa-Hernández et al., 2022). En brotes proliferados de pistacho se ha observado la ausencia de necrosis de la punta del brote cuando son cultivados en el RITA en comparación con los medios semi sólidos, pero el enraizamiento fue mejor en medio semi sólido (Akdemir et al., 2014). Por otro lado, el cultivo de kiwi usando un BIT demostró mayor eficiencia en la multiplicación de hojas y brotes, pero presentó el menor porcentaje de aclimatación (López-Páez et al., 2025). Algunas desventajas de los SIT se pueden evitar si se optimizan las condiciones de operación del biorreactor o se aplican tratamientos fitohormonales previo a la aclimatación.

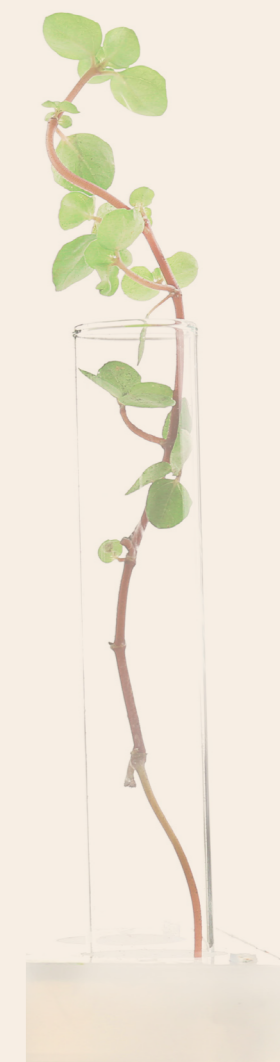
4 CONCLUSIONES

Los Sistemas de Inmersión Temporal representan una alternativa viable para el cultivo de diversas plantas, mostrando un buen desempeño en comparación con los cultivos semi sólidos. En algunos casos se ha observado una mejora en la proliferación de brotes, formación de raíces y supervivencia en la aclimatación, también se ha reportado una reducción en la hiperhidricidad en comparación con las plantas que están permanentemente sumergidas en un medio líquido y una reducción de costos de mano de obra debido a la automatización y la ausencia de agentes gelificantes que encarecen el proceso.

Su uso a mediana y gran escala también ha evidenciado su utilidad práctica ayudando a la propagación y conservación de plantas y se puede contribuir con la reforestación de ecosistemas alterados. Los Sistemas de Inmersión Temporal presentan algunos desafíos en cuanto a su diseño y escalamiento y generan oportunidades de investigación para la optimización de los parámetros de operación, aplicación en diversas especies de plantas y su integración en procesos industriales.

5 AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica de Tlaxcala.



REFERENCIAS

- Afreen F (2008) Temporary immersion bioreactor. In Plant tissue culture engineering. Edited by SD Gupta and Y Ibaraki. Dordrecht: Springer, Netherlands. 187-201 pp.
- Akdemir H, Süzerer V, Onay A, Tilkat E, Ersali Y, Çiftçi YO (2014) Micropropagation of the pistachio and its rootstocks by temporary immersion system. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 117:65-76.
- Akita M, Ohta Y (1998) A simple method for mass propagation of potato (*Solanum tuberosum* L.) using a bioreactor without forced aeration. *Plant Cell Rep* 18:284-287.
- Baltazar-Bernal O, Mora-González EG (2024) Micropropagation of *Encyclia cordigera* (Kunth) Dressler in ebb-and-flow bioreactor. In *Micropropagation Methods in Temporary Immersion Systems*. Edited by MA Ramírez-Mosqueda and CA Cruz-Cruz. Springer, New York. 137-147 pp.
- Correa-Hernández L, Baltazar-Bernal O, Sánchez-Páez R, Bello-Bello JJ (2022) In vitro multiplication of agave tobalá (*Agave potatorum* Zucc.) using ebb-and-flow bioreactor. *S. Afr. J. Bot.* 147:670-677.
- Chakrabarty D, Dewir YH, Hahn EJ, Datta SK, Paek KY (2007) The dynamics of nutrient utilization and growth of apple root stock "M9 EMLA" in temporary versus continuous immersion bioreactors. *Plant Growth Regul* 51:11-19.
- Daniels D, Itza C, Pat J, Guerra D, Williams S (2018) Enhancing the Protocol for Efficient Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Micropropagation using the BioMINT Temporary Immersion System in the Variety B79-474. *Int J Sci Eng Res* 6:8-11.
- Ducos JP, Labbe G, Lambot C, Pétiard V (2007) Pilot scale process for the production of pre-germinated somatic embryos of selected robusta (*Coffea canephora*) clones. *In Vitro Cell Dev Biol-Plant* 43:652-659.
- El-Hawaz RF, Bridges WC, Adelberg JW (2015) In vitro growth of *Curcuma longa* L. in response to five mineral elements and plant density in fed-batch culture systems. *PLoS One* 10:e0118912.
- Georgiev V, Schumann A, Pavlov A, Bley T (2014) Temporary immersion systems in plant biotechnology. *Eng. Life Sci.* 14:607-621.
- Ivanova M, Van Staden J (2011) Influence of gelling agent and cytokinins on the control of hyperhydricity in *Aloe polyphylla*. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 104:13-21.
- Kumar N, Reddy MP (2011) In vitro plant propagation: a review. *J For Environ Sci* 27:61-72.
- Loberant B, Altman A (2010) *Micropropagation of plants*. Encyclopedia of industrial biotechnology: bioprocess, bioseparation, and cell technology. Wiley, New York.
- López-Escamilla AL, Badillo-Huerta V, Rodríguez-Cuamatzi P, García-Dávila J, Sánchez-Minutti L (2024) Bioactive compounds in *Laelia speciosa* (Orchidaceae) seedlings grown in temporary immersion bioreactor. *Mex J Biotechnol* 9:19-32.
- López-Páez FK, Galindo-Tovar ME, García-Martínez MÁ, Serna-Lagunes R, Solano-Rodríguez LA, Pastelín-Solano MC, Castañeda-Castro O, Cruz-Castillo JG (2025) Multiplication of *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* in three in vitro culture systems. *N Z J Crop Hortic Sci* 1-11.
- Martínez-Estrada E, Islas-Luna B, Pérez-Sato JA, Bello-Bello JJ (2019). Temporary immersion improves in vitro multiplication and acclimatization of *Anthurium andreaeanum* Lind Sci Hort 249:185-191.
- Mirzabe AH, Hajjahmad A, Fadavi A, Rafiee S (2022) Temporary immersion systems (TISs): A comprehensive review. *J Biotechnol* 357:56-83.
- Mosqueda Frometa O, Escalona Morgado MM, Teixeira da Silva JA, Pina Morgado DT, Daquinta Gradaille MA (2017) In vitro propagation of *Gerbera jamesonii* Bolus ex Hooker f. in a temporary immersion bioreactor. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 129:543-551.
- Mwaniki IW (2021) Optimising Somatic Embryos Formation in *Coffea arabica* cultivar ruiru using temporary immersion systems In Kenya. JKUAT-IBR.
- Navarro GEZ, Honorato AES, Oyarzun AGC, Rodríguez EAT, Encalada HGP, Cantillana PAZ (2013) U.S. Patent Application No. 13/884,365.
- Nicholson J, Shukla, MR, Saxena, PK (2020) In vitro rooting of hybrid hazelnuts (*Corylus avellana* × *Corylus americana*) in a temporary immersion system. *Botany* 98: 343-352.
- OpenAI. (2026). Biorreactores [imágenes generadas con IA]. <https://gemini.google.com>
- Phuc VT, Trung NM, Thien HT, Tien LTT (2017) Proliferation and ajmalicine biosynthesis of *Catharanthus roseus* (L). G. Don adventitious roots in self-built temporary immersion system. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, p. 20018.
- Quiala E, Canal MJ, Meijon M, Rodríguez R, Chavez M, Valledor L, Fera M, Barbon R (2012) Morphological and physiological responses of proliferating shoots of teak to temporary immersion and BA treatments. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 109:223-234.
- Reis RV, Borges APPL, Chierrito TPC, de Souto ER, de Souza LM, Iacomini, M, de Oliveira AJB, Gonçalves RAC (2011) Establishment of adventitious root culture of *Stevia rebaudiana* Bertoni in a roller bottle system. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 106:329-335.
- Roels S, Noceda C, Escalona M, Sandoval J, Canal MJ, Rodrigues R, Debergh P (2006) The effect of headspace renewal in a temporary immersion bioreactor on plantain (*Musa AAB*) shoot proliferation and quality. *Plant Cell Tiss Organ Cult*. 84:155-163.
- Scheidt GN, Arakaki AH, Chimilovski JS, Portella ACF, Spier MR, Woiciechowski AL, Biasi AL, Soccol CR (2009) Utilization of the bioreactor of immersion by bubbles at the micropropagation of *Ananas comosus* L. Merrill. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 52:37-43.
- Scheidt GN, Silva AD, Oliveira YD, Costa JDL, Biasi LA, Soccol CR (2011) In vitro growth of *Melaleuca alternifolia* Cheel in bioreactor of immersion by bubbles. *Pak. J. Bot.* 43:2937-2939.
- Sereda M 2024 Micropropagation of *Vaccinium corymbosum* L. 'Bluecrop' in rocker temporary immersion system (TIS) bioreactor. *Yuz. Yil Univ. J. Agric. Sci* 34:442-451.
- Vitropic (2018) *RITA®: Temporary immersion bioreactor system manual*. <https://www.vitropic.fr/pdf/Manual-RITA-EN.pdf>
- Valdés YC, Shukla MR, Vega MEG, Saxena PK (2021). Improved conservation of coffee (*Coffea arabica* L.) germplasm via micropropagation and cryopreservation. *Agron* 11:1861.
- yFigueroa MDL, Tapia JFB, Hajari E, Escalona M, Etienne H, Feijoo JCL (2021) Agronomic performance of temporary immersion bioreactor-derived potato microtubers in a peruvian low input cropping agriculture system. *Afr J Biotechnol* 21:125-132.

BIOSURFACTANTES: UNA HERRAMIENTA CLAVE PARA LA BIOTECNOLOGÍA SOSTENIBLE

José Antonio Chávez Gómez, José Luis Torres García, Diana Verónica Cortés Espinosa*

Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Tlaxcala. Ex-Hacienda San Juan Molino, Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km. 1.5, C.P. 90700. Tlaxcala, México.



RESUMEN

Los biosurfactantes (BS) son compuestos anfífilos sintetizados por microorganismos que desempeñan un rol imperante al disminuir la tensión superficial entre sustancias hidrofóbicas, facilitando su biodisponibilidad y solubilidad. Durante las últimas décadas, su adopción en la industria ha aumentado debido a ventajas como su biodegradabilidad, su baja toxicidad y su eficiencia en procesos industriales y ambientales en condiciones adversas o extremas, superando así a los surfactantes sintéticos en diversos ámbitos de aplicación. Este artículo revisa los aspectos fundamentales de los BS, desde su producción y clasificación hasta sus aplicaciones y estrategias para optimizar su síntesis, destacando su relevancia en la transición hacia tecnologías sostenibles.

Palabras clave: Biosurfactantes, Microorganismos, Tensión superficial, Bioprocesos, Ambiente

ABSTRACT

Biosurfactants (BS) are amphiphilic compounds synthesized by microorganisms that play a crucial role in reducing the surface tension between hydrophobic substances, thereby enhancing their bioavailability. Over the past decades, their adoption in industry has increased due to advantages such as biodegradability, low toxicity, and efficiency in industrial and environmental processes under adverse conditions, surpassing synthetic surfactants in various applications. This article reviews the fundamental aspects of BS, including their production, classification, applications, and production strategies, emphasizing their importance in the transition toward sustainable technologies.

Keywords: Biosurfactants, Microorganisms, Surface tension, Bioprocesses, Environment.

INTRODUCCIÓN

Los surfactantes, también llamados tensioactivos, son compuestos anfifílicos, término que se refiere a una molécula de estructura dual compuesta por una porción hidrofílica y otra hidrofóbica. Gracias a esta estructura tienen la capacidad de reducir la tensión superficial entre sustancias inmiscibles (Moldes et al., 2021). Esta propiedad les permite actuar como agentes emulsificantes, dispersantes y espumantes, lo que ha llevado a su amplia aplicación en sectores industriales como el farmacéutico, de cosméticos, alimentario y el petrolero (Sun et al., 2022). El ejemplo más claro de sustancias inmiscibles son el agua y el aceite, ambas sustancias no se mezclan, en su lugar se forma una capa que las separa, a esta capa se le denomina interfase y un surfactante es capaz de debilitarla y solubilizar parcialmente ambas sustancias (Qazi et al., 2020). Los surfactantes pueden clasificarse de acuerdo con su fuente de obtención en dos grandes grupos: aquellos producidos por procesos químicos sin-

téticos derivados del petróleo y los de origen biológico, a partir de plantas o microorganismos. En cuanto a los surfactantes sintetizados químicamente, presentan la desventaja de ser tóxicos y la mayoría no son biodegradables, la principal ruta de entrada de éstos al ambiente ocurre mediante los sistemas de aguas residuales. Al ser producidos a escala global y tener gran demanda por su uso cotidiano se han clasificado como contaminantes emergentes capaces de formar espumas, las cuales al llegar a los cuerpos de agua se convierten en una barrera que provoca la disminución del oxígeno disuelto llevando a condiciones hipóxicas, con consecuencias negativas para los organismos acuáticos (Jena et al., 2023). Si el humano tiene una exposición prolongada a los surfactantes químicos se presentan daños a nivel celular, porque las cargas de estas moléculas permiten su adhesión a las membranas plasmáticas interrumpiendo distintos procesos celulares llevando a la lisis y muerte

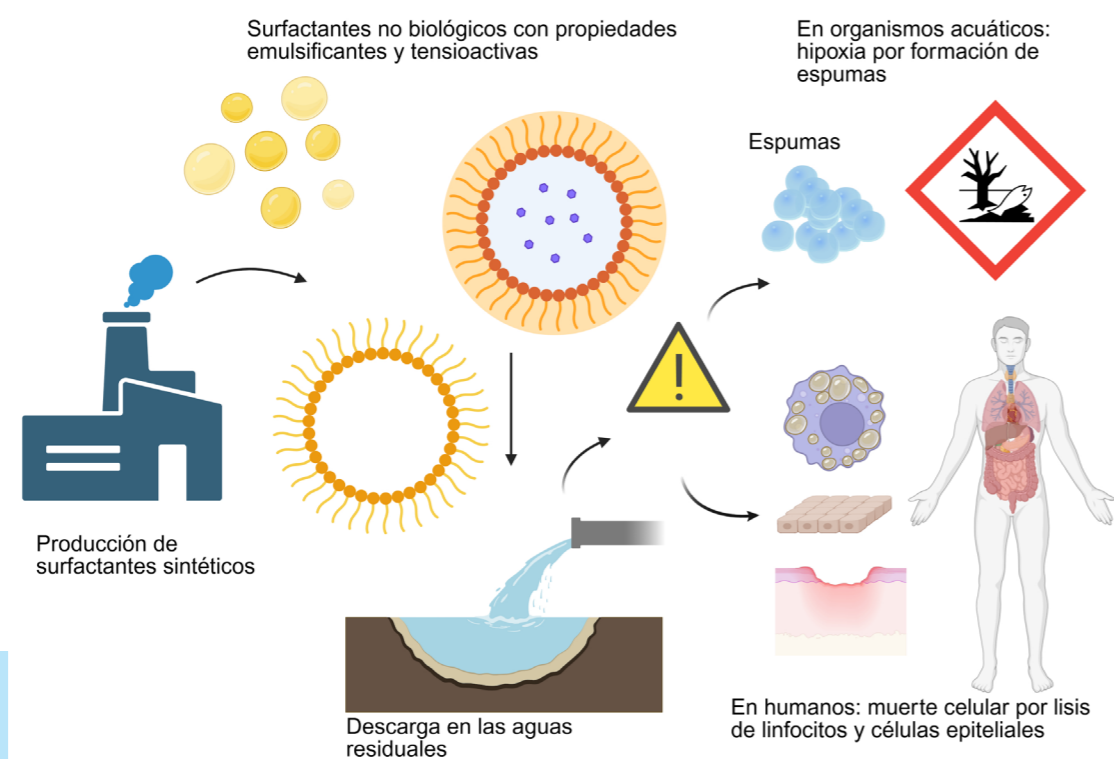


Figura 1. Surfactantes sintéticos y su daño a la salud.

celular, por ejemplo, se ha reportado el daño en linfocitos (cuando hay ingesta) y en células epiteliales (cuando el contacto es dérmico) (Aslam et al., 2023).

Por ello se ha optado por el uso de surfactantes de origen biológico los cuales son denominados biosurfactantes, producidos como metabolitos secundarios (MS) por microorganismos como bacterias, hongos y levaduras; no son tóxicos,

son biocompatibles y biodegradables (Bhadra et al., 2023; Sharma et al., 2023). Se han reportado un gran número de microorganismos productores de BS, específicamente aquellos que habitan en ambientes contaminados por hidrocarburos. Este patrón sugiere que la síntesis de BS forma parte de una estrategia de supervivencia. El presente artículo tiene la finalidad de describir a grandes rasgos los aspectos generales y fundamentales de los biosurfactantes, así como sus ventajas sobre los surfactantes sintéticos y las estrategias para su producción a gran escala encaminando los bioprocesos a una biotecnología realmente sostenible.

2 BIOSURFACTANTES

Los biosurfactantes (BS) son compuestos anfifílicos de origen biológico constituidos en su estructura por una porción hidrofílica (afinidad por el agua) y una porción hidrofóbica (afinidad por las grasas) (Figura 2) (Jahan et al., 2020). Su función biológica consiste en la difusión de sustancias a través de la membrana celular, en la formación de biopelículas, en la regulación de la presión osmótica, que le permite a la célula utilizar moléculas no biodisponibles como fuente de carbono y energía (Fracchia et al., 2015; Santos et al., 2016; Banat et al., 2021).

La parte hidrofílica de un BS es soluble en agua y su estructura puede ser iónica, no iónica o anfótera; puede estar constituida por monosacáridos y/o polisacáridos, polipéptidos, proteínas, alcoholes, ácidos carboxílicos y fosfatos (Sarubbo et al., 2022). Mientras que la parte hidrofóbica se encuentra constituida por cadenas hidrocarbonadas de 8 hasta 18 carbonos conformadas por un ácido graso saturado, un hidroxiácido o un α -álcali- β -hidroxiácido saturado o insaturado (Cai, 2019). Estas moléculas poseen la capacidad de aumentar la solubilidad de sustancias hidrofóbicas, pues se forman monómeros que constituyen estructuras micelares, que al incrementar su conformación se denomina concentración micelar crítica (CMC) (Figura 2). Se forman dos porciones polares que se posicionan en la parte acuosa y las porciones apolares se posicionan hacia la parte oleosa. A partir de esta organización molecular es posible la dis-

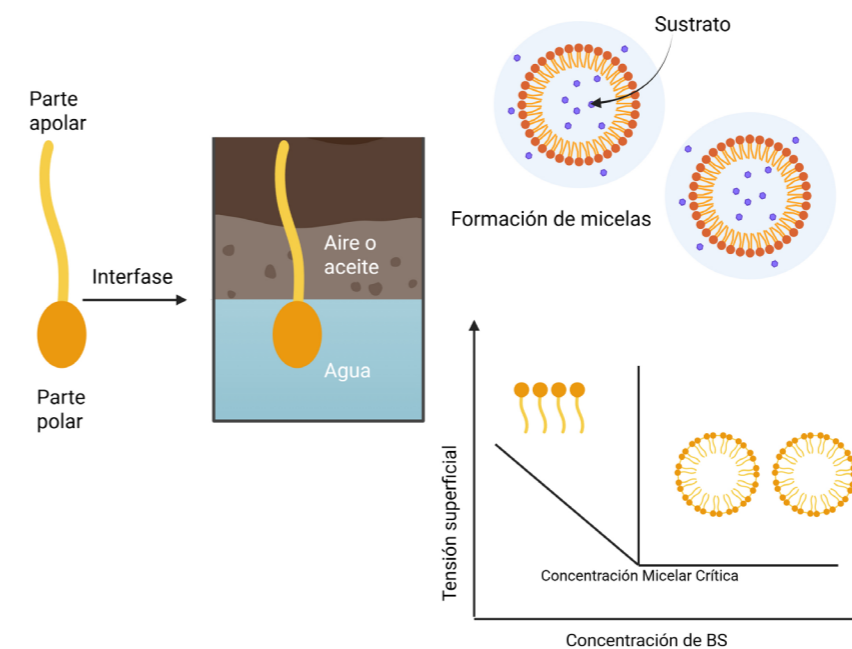


Figura 2. Molécula tensioactiva de los biosurfactantes con su fracción hidrofóbica e hidrofílica en una interfase y su concentración micelar crítica.

minución de las tensiones superficiales e interfaciales y la emulsificación de sustancias que posteriormente los microorganismos utilizan como fuente de carbono y energía (Jahan et al., 2020; Banat et al., 2021).

En lo que respecta a la producción de BS microbianos, se cuenta con información sobre diversas especies, entre las que destacan bacterias como *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas putida*; levaduras del género *Candida*; y hongos filamentosos: *Aspergillus ustus*, *Ustilago maydis*, *Fusarium fujikuroi* y *Penicillium chrysogenum* (Markande et al., 2021).



2.1 Clasificación

Los BS se pueden clasificar de acuerdo a su origen microbiano, su polaridad, su potencial de acción y su peso molecular, el cual oscila entre 500 Da y 1500 Da. Los BS de bajo peso molecular agrupan a los glicolípidos y lipopéptidos, mientras que los de alto peso molecular congregan a polisacáridos, proteínas, lipoproteínas y lipopolisacáridos (Drakontis & Amin, 2020). Cada grupo tiene características físico-químicas y funciones fisiológicas específicas según su estructura química, los glicolípidos son compuestos que consisten en una porción lipídica unida a uno o más carbohidratos (Sharma et al., 2021). Estos BS contienen soforosa se denominan soforolípidos; aquellos con ramnosa como parte hidrofílica, son ramnolípidos; mientras que a los BS con trehalosa se les atribuye el nombre de trehalosalípidos;

Tabla 1. Tipos más comunes de biosurfactantes, origen y estructura química.

Biosurfactante	Origen microbiano	Aplicaciones	Referencia
Ramnolípidos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Agentes emulsificantes y tensioactivos en procesos de biorremediación de hidrocarburos, formulaciones antimicrobianas y como ingredientes en la industria cosmética y farmacéutica.	(Fracchia et al., 2015)
Soforolípidos	<i>Candida</i> spp.	Ingredientes en cosméticos y productos de cuidado personal, agentes emulsificantes en la industria alimentaria y como sustancias con actividad superficial.	(Banat et al., 2021)
Surfactinas	<i>Bacillus subtilis</i>	Agentes antivirales (inhibición de fusión viral), antimicrobianos, aplicaciones en biorremediación y potencial en recuperación mejorada de petróleo.	(Sharma et al., 2021)
Glicolípidos	Diversos (e.g., <i>Pseudomonas</i> , <i>Candida</i> , <i>Bacillus</i>)	Agentes emulsificantes y tensioactivos para la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica y procesos de biorremediación.	(Drakontis & Amin, 2020)
Lipopéptidos	<i>Bacillus</i> spp. (e.g., <i>B. subtilis</i> , <i>B. licheniformis</i>)	Propiedades antimicrobianas, antivirales e inmunomoduladoras; aplicaciones en formulaciones farmacéuticas, cosméticas y como agentes en biorremediación.	(Sharma et al., 2021; Markande et al., 2021)
Lipopolisacáridos	Bacterias Gram-negativas (e.g., <i>Pseudomonas</i> , <i>Enterobacter</i>)	Estabilizadores de emulsiones, aplicaciones en la industria alimentaria y cosmética como agentes espesantes, gelificantes y en procesos de biorremediación.	(Drakontis & Amin, 2020; Markande et al., 2021)

por mencionar algunos ejemplos (Tabla 1). De todos los tipos de glicolípidos, los soforolípidos y los ramnolípidos siguen siendo los BS más estudiados por sus múltiples aplicaciones en la industria como espumantes y emulsificantes (Banat et al., 2021; Fracchia et al., 2015). En cuanto a los lipopéptidos y las lipoproteínas (Tabla 1), estas son moléculas que combinan una porción peptídica con una cadena lipídica, tal es el caso de las surfactinas, empleadas en distintas actividades de ruptura de la tensión superficial ya que es un BS muy potente, así como las iturinas que son utilizadas como antimicrobianos de amplio espectro (Sharma et al., 2021).

3 SÍNTESIS METABÓLICA DE LOS BIOSURFACTANTES

La producción de BS es un proceso fascinante que varía según el tipo de microorganismo y el tipo específico de BS a producir (Figura 3), un aspecto interesante es que las porciones de estas moléculas pueden ser sintetizadas de manera independiente o dependiente de sustratos específicos (Jahan et al., 2020). Los microorganismos al utilizar fuentes de carbono hidrofílicas (glucosa, melazas), la glucosa-6-fosfato (G6P), generada por la glucólisis, actúa como precursor de componentes hidrofílicos (trehalosa, polisacáridos), mientras el piruvato derivado de la glucosa se transforma en acetil-CoA para producir ácidos grasos mediante lipogénesis (Farias et al., 2021). Con sustratos hidrofóbicos (aceites, hidrocarburos), los ácidos grasos se degradan mediante β -oxidación, generando acetil-CoA. Este compuesto se redirige para sintetizar G6P, y los ácidos grasos residuales contribuyen a las porciones hidrofóbicas. Este sistema dual de biosíntesis permite a los microorganismos adaptarse a diversos entornos, integrando eficientemente sustratos contrastantes (Jahan et al., 2020; Patel et al., 2023).

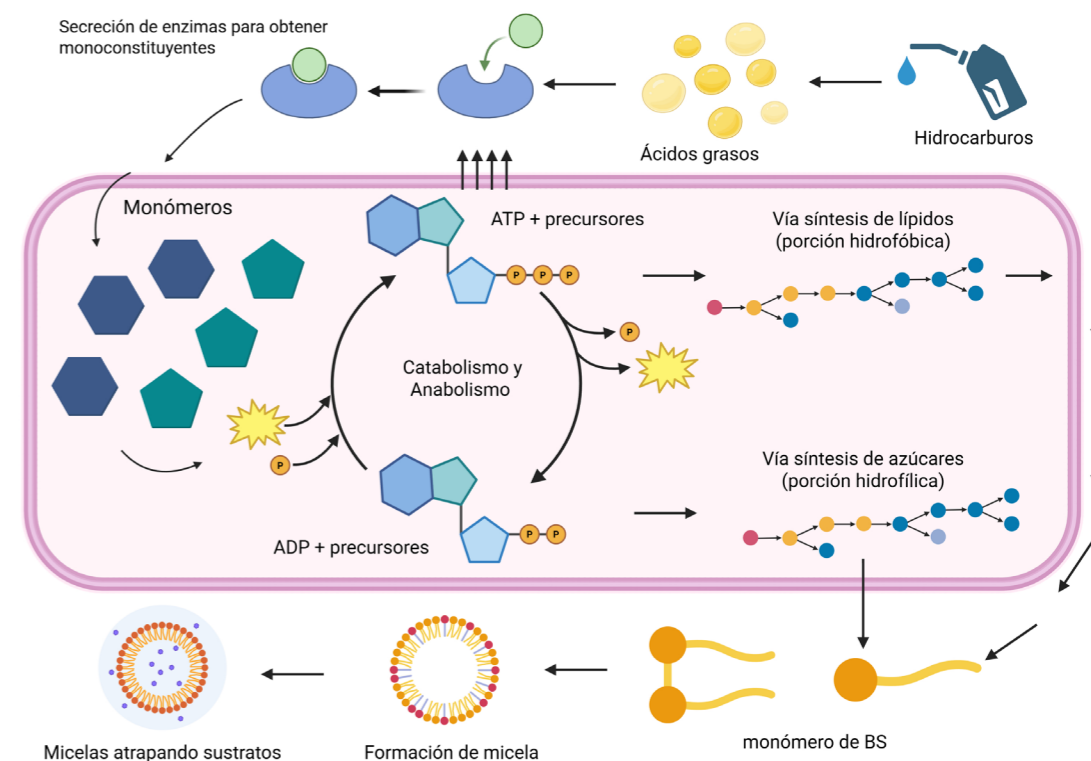


Figura 3. Biosíntesis de biosurfactantes por células microbianas.

4 BIOSURFACTANTES VS SURFACTANTES SINTÉTICOS

El mercado de los surfactantes ha adquirido un protagonismo fundamental en la dinámica industrial contemporánea, consolidándose como un pilar esencial en la cadena de valor de numerosos sectores productivos. Su relevancia radica en la capacidad de estos compuestos para ser ingredientes insustituibles en una amplia gama de aplicaciones (Fernandes et al., 2023), esta tendencia de producción y consumo ha estado incrementando constantemente desde hace décadas (Sajna et al., 2019). No obstante, se plantean importantes desafíos ambientales ya que aproximadamente el 90% del mercado corresponde a sur-

factantes sintéticos derivados de recursos fósiles no renovables. La obtención de los tensioactivos biológicos es un factor importante a considerar dentro de este mercado debido a las ventajas (Tabla 2) que presentan frente a los surfactantes sintéticos. Adicionalmente, los BS presentan una biodegradabilidad superior al 90% frente al 60% mínimo exigido a los sintéticos por la normativa europea, eliminando problemas de persistencia y bioacumulación, mientras que al final de su vida útil se reintegran eficientemente a los ciclos biogeoquímicos naturales sin generar metabolitos tóxicos (Banat et al., 2021).

Ventaja	Descripción comparativa	Referencia
Biodegradabilidad y baja persistencia ambiental	Se degradan rápidamente por microorganismos ambientales, minimizando la acumulación en suelos y aguas.	(Banat et al., 2021; Sarubbo et al., 2022)
Baja o nula toxicidad, mayor seguridad	Exhiben una toxicidad significativamente menor hacia organismos acuáticos, células humanas y el microbioma del suelo.	(Banat et al., 2021; Moldes et al., 2021; Bhadra et al., 2023)
Alta eficacia en condiciones extremas	Aplicaciones en procesos industriales exigentes como la recuperación de petróleo en yacimientos o biorremediación en ambientes contaminados.	(Jahan et al., 2020; Banat et al., 2021)
Menor concentración micelar crítica	Logran reducir la tensión superficial e interfacial a concentraciones significativamente más bajas que sus análogos sintéticos.	(Sharma et al., 2021; Bhadra et al., 2023)
Funcionalidad adicional	Poseen propiedades biológicas con actividad antimicrobiana, antiviral, antiadherente (inhibición de biopelículas) e inmunomoduladora.	(Banat et al., 2021; Dabaghi et al., 2023; Fernandes et al., 2023)
Compatibilidad con sistemas biológicos y sostenibilidad	Estimulan la actividad biológica de los microorganismos nativos en las matrices ambientales. Los BS pueden ser producidos a partir de recursos renovables mediante procesos de fermentación, promoviendo una economía circular.	(Banat et al., 2021; Dabaghi et al., 2023; Fernandes et al., 2023)
Especificidad estructural y selectividad	Su estructura química puede conferirles una mayor selectividad y eficiencia en aplicaciones como la separación de enantiómeros en la industria farmacéutica o la movilización selectiva de metales pesados en biorremediación.	(Sarubbo et al., 2022)

Tabla 2. Características principales de los biosurfactantes frente a los surfactantes sintéticos.

5 ESTRATEGIAS DE PRODUCCIÓN DE LOS BIOSURFACTANTES

La optimización del proceso de producción y la modificación genética de los microorganismos productores son dos principales estrategias en la producción de BS. La primera se centra en ajustar nutrientes clave (C, N, P, Fe) y sus relaciones (C:N, C:P) y utilizar sustratos como los residuos agroindustriales que es materia prima renovable que aporten precursores para síntesis de BS. Además, parámetros como temperatura, agitación, tipo de fermentación y aeración son cruciales para maximizar los rendimientos de producción (Banat et al., 2021; Dabaghi et al., 2023). Estos ajustes se

evalúan mediante análisis estadísticos para definir las condiciones óptimas, lo que también facilita su posterior purificación. Los procesos son alternativas sostenibles clave para el manejo y gestión de los residuos, al permitir la valorización de subproductos agroindustriales como el bagazo de caña, las vinazas, los exocarpios de frutas y verduras, así como los aceites usados. Lejos de ser desechos, estos materiales pueden ser transformados en recursos de alto valor añadido mediante métodos biotecnológicos. Ejemplos concretos de estos bioprocesos son la fermentación en estado líqui-

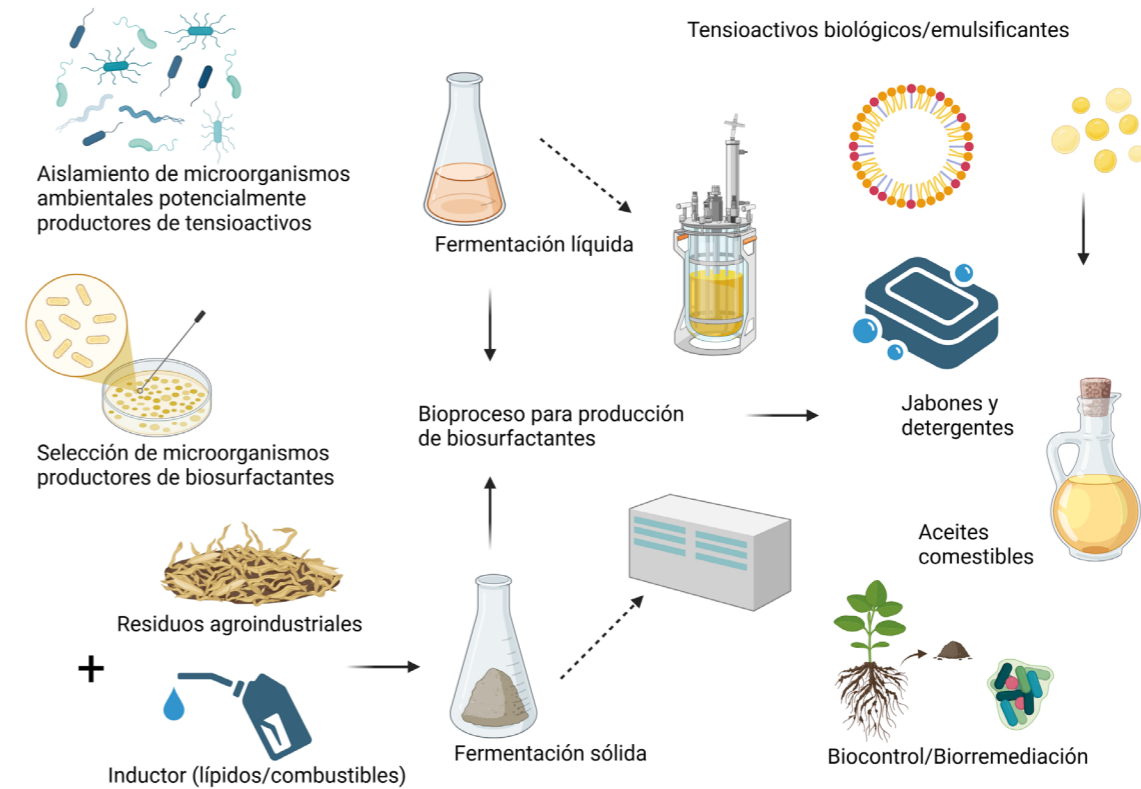


Figura 4. Esquema general del bioproceso de producción de surfactantes biológicos.

do (ideal para residuos como las vinazas) y la fermentación en estado sólido (utilizada para residuos con poca humedad, como el bagazo), que actúan como plataformas biotecnológicas para convertir residuos en productos como los biosurfactantes como componentes de jabones o aceites; además de ser aplicados en sistemas de biorremediación (Figura 4). Por otro lado, la manipulación genética ha surgido como herramienta clave para incrementar la producción de BS. Mediante técnicas como el ADN recombinante, se insertan genes específicos o se silencian aquellos que limitan la síntesis, incluso eliminando genes asociados a patogenicidad para garantizar seguridad en aplicaciones industriales.

Métodos como la mutagénesis aleatoria o dirigida permiten optimizar cepas microbianas, reduciendo costos y mejorando eficiencia (Sharma et al., 2021; Chabhadiya et al., 2024). Sin embargo, esto requiere un conocimiento detallado de los genes involucrados y ajustes en las condiciones de cultivo. Ambas estrategias deben integrarse de manera complementaria: la optimización de nutrientes y procesos físicos, junto con el diseño genético de microorganismos, permite escalar la producción de BS de forma sostenible. Esto no solo beneficia sectores como la biorremediación o la industria alimentaria, sino que también impulsa su uso en cosméticos y farmacéuticos, asegurando procesos más seguros y eficientes.



6 CONCLUSIÓN

La creciente demanda industrial de productos biotecnológicos eficientes y sostenibles ambientalmente, ha posicionado a los biosurfactantes como una alternativa estratégica en diversos sectores. Para aprovechar plenamente su potencial, es imperativo profundizar en la investigación científica que permita identificar microorganismos productores, optimizar las condiciones de cultivo y comprender las rutas metabólicas involucradas en su biosíntesis, donde los bioprocesos de fermentación utilizando residuos y la ingeniería genética juegan un papel clave para mejorar los rendimientos. Finalmente, el verdadero desafío trasciende del laboratorio pues es fundamental que la investigación en bioprocesos adopte un enfoque aplicado que contemple escenarios reales y los retos del escalamiento industrial, garantizando así que, la producción de biosurfactantes sea no solo técnicamente factible, sino también económicamente viable.



REFERENCIAS

Aslam, R., Mobin, M., Aslam, J., & Zehra, S. (2023). Advancements in Biosurfactants Research. In *Advancements in Biosurfactants Research*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21682-4>

Banat, I. M., Carboué, Q., Saucedo-Castañeda, G., & de Jesús Cázares-Marino, J. (2021). Biosurfactants: The green generation of speciality chemicals and potential production using Solid-State fermentation (SSF) technology. In *Bioresource Technology* (Vol. 320). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124222>

Bhadra, S., Chettri, D., & Kumar Verma, A. (2023). Biosurfactants: Secondary Metabolites Involved in the Process of Bioremediation and Biofilm Removal. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 195(9), 5541–5567. <https://doi.org/10.1007/S12010-022-03951-3/FIGURES/1>

Cai, Q. (2019). *Biosurfactant production and applications in oil contaminate control*.

Chabhadiya, S., Acharya, D. K., Mangrola, A., Shah, R., & Pithawala, E. A. (2024). Unlocking the potential of biosurfactants: Innovations in metabolic and genetic engineering for sustainable industrial and environmental solutions. In *Biotechnology Notes* (Vol. 5, pp. 111–119). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.07.001>

Dabaghi, S., Ataei, S. A., & Taheri, A. (2023). Production of rhamnolipid biosurfactants in solid-state fermentation: process optimization and characterization studies. *BMC Biotechnology*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12896-022-00772-4>

Fernandes, N. de A. T., Simões, L. A., & Dias, D. R. (2023). Biosurfactants Produced by Yeasts: Fermentation, Screening, Recovery, Purification, Characterization, and Applications. *Fermentation* 2023, Vol. 9, Page 207, 9(3), 207. <https://doi.org/10.3390/fermentation9030207>

Jahan, R., Bodratti, A. M., Tsianou, M., & Alexandridis, P. (2020). Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: Physicochemical properties and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 275, 102061. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102061>

Jena, G., Dutta, K., & Daverey, A. (2023). Surfactants in water and wastewater (greywater): Environmental toxicity and treatment options. *Chemosphere*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140082>

Markande, A. R., Patel, D., & Varjani, S. (2021). A review on biosurfactants: properties, applications and current developments. *Bioresource Technology*, 330, 124963. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124963>

Moldes, A. B., Rodríguez-López, L., Rincón-Fontán, M., López-Prieto, A., Vecino, X., & Cruz, J. M. (2021). Synthetic and bio-derived surfactants versus

microbial biosurfactants in the cosmetic industry: An overview. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 22, Number 5, pp. 1–23). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijms22052371>

Qazi, M. J., Schlegel, S. J., Backus, E. H. G., Bonn, M., Bonn, D., & Shahidzadeh, N. (2020). Dynamic Surface Tension of Surfactants in the Presence of High Salt Concentrations. *Langmuir*, 36(27), 7956–7964. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01211/ASSET/IMAGES/LARGE/LA0C01211_0004.JPG

Sajna, K. V., Gottumukkala, L. D., Sajna, K. V., & Gottumukkala, L. D. (2019). *Biosurfactants in Bioremediation and Soil Health*. 353–378. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9117-0_15

Sarubbo, L. A., Silva, M. da G. C., Durval, I. J. B., Bezerra, K. G. O., Ribeiro, B. G., Silva, I. A., Twigg, M. S., & Banat, I. M. (2022). Biosurfactants: Production, properties, applications, trends,

and general perspectives. *Biochemical Engineering Journal*, 181, 108377. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108377>

Sharma, J., Sundar, D., & Srivastava, P. (2021). Biosurfactants: Potential Agents for Controlling Cellular Communication, Motility, and Antagonism. In *Frontiers in Molecular Biosciences* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2021.727070>

Sun, Z., Yan, X., Xiao, Y., Hu, L., Eggersdorfer, M., Chen, D., Yang, Z., & Weitz, D. A. (2022). Pickering emulsions stabilized by colloidal surfactants: Role of solid particles. *Particology*, 64, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2021.06.004>

PECTINAS: MACROMOLÉCULAS SALUDABLES, AMPLIAMENTE DISPONIBLES Y POCO RECONOCIDAS

Adriana Inés Rodríguez Hernández*, Ana Cristina Morales Vargas, Carolina Burgos González, Quetzalli Hernández Chávez, Norberto Chavarría Hernández*

Cuerpo Académico de Biotecnología Agroalimentaria. Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Avenida Universidad #133, Col. San Miguel Huatengo. C.P. 43775. Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo. México.

*Autores para correspondencia: inesr@uaeh.edu.mx; norberto@uaeh.edu.mx



RESUMEN

Las pectinas, a doscientos años de su descubrimiento y reconocimiento, continúan siendo macromoléculas que se destacan por sus aplicaciones versátiles, seguridad y potencial para el desarrollo de productos innovadores en múltiples industrias. Este artículo ofrece una síntesis histórica sobre su evolución, desde ingrediente culinario hasta molécula relevante en biotecnología por sus propiedades bioactivas y perfil de seguridad. Se detallan su estructura química, fuentes y tecno-funcionalidad. Estas macromoléculas vegetales han sido estudiadas por ser ingredientes naturales con capacidad para formar geles, texturizar o estabilizar productos alimenticios, así como por su actividad biológica diversa. En la última década, se han evaluado múltiples aplicaciones biotecnológicas y los polisacáridos estructurales de las pectinas han sido analizados por sus efectos antioxidantes, antiinflamatorios, prebióticos y antitumorales. Sin embargo, futuras investigaciones deberán esclarecer el papel de las pectinas en la promoción de la salud integral y su potencial preventivo y terapéutico.

Palabras clave: polisacáridos pécticos, oligosacáridos, fibra dietética, polisacáridos funcionales.

ABSTRACT

Two hundred years after their discovery and recognition, pectins continue to be macromolecules that stand out for their versatile applications, safety, and potential for the development of innovative products in multiple industries. This article offers a historical overview of their evolution, from a culinary ingredient to a relevant molecule in biotechnology due to its bioactive properties and safety profile. Their chemical structure, sources, and techno-functionality are detailed. These plant macromolecules have been studied both for their ability as natural ingredients capable of forming gels, texturizing or stabilizing food products, and for their biological activity. In the last decade, various biotechnological applications have been evaluated, and their pectic polysaccharides have been examined for their antioxidant, anti-inflammatory, prebiotic, and antitumor effects. However, future studies should clarify the role of pectins in promoting overall health and their preventive and therapeutic potential.

Keywords: pectic polysaccharides, oligosaccharides, dietary fiber, functional polysaccharides.

¿QUÉ SON LAS PECTINAS? RESEÑA HISTÓRICA

“Pectina” es un término que se usa para nombrar a una familia de moléculas muy grandes en tamaño y masa –macromoléculas–, que están presentes en las células de vegetales en donde funcionan como pegamento de fibras conocidas como celulosas o hemicelulosas. Se presume que la primera pectina se obtuvo del tamarindo en 1790 por el químico francés Louis Nicolas Vauquelin, a quien su curiosidad lo llevó a aislar una sustancia soluble en agua capaz de formar conservas de frutas gelificadas (Vauquelin, 1790). En 1825, ¡Hace doscientos años!, Henri Braconnot (Braconnot, 1825) describió las propiedades químicas de una sustancia ácida universalmente extendida en todas las plantas y la nombró “pectina” (del griego “pektikos” que significa solidificar o cuajar). En sus estudios, Braconnot destacó la capacidad de la pectina para formar geles en presencia de grandes cantidades de agua azucarada, presagiando numerosas aplicaciones en repostería y confitería.

Las pectinas se han usado ancestralmente en cocinas europeas, hay recetarios del siglo XVI-II en donde se describe el uso de frutas ricas en pectinas como el membrillo, la manzana y la grosella. Sin embargo, la producción industrial de pectinas se inició en Alemania alrededor de 1908. Posteriormente, en 1913, Robert Douglas obtuvo en Estados Unidos la primera patente de la extracción de pectina de manzana, la cual nombró “pectosa” –ingrediente para elaborar mermeladas, jaleas o fruta enlatada– (Douglas, 1913). Entre los años 1920 y 1940 se estableció la producción comercial de pectinas a escala industrial en diferentes países. Se obtenían principalmente del orujo de manzana y de las cáscaras de cítricos, desechos de la industria de jugos. A finales del siglo XX la producción de pectinas se fue reubicando en regiones con gran producción de frutas ricas en pectinas (cítricos, manzana y remolacha, principalmente) como Europa, México, Brasil y China (Ciriminna et al. 2015). En el año 2022 los principales países exportadores de pectinas fueron Alemania, Dinamarca y México (Gobierno de México, 2025). En la figura 1 se presenta la historia resumida de las pectinas.

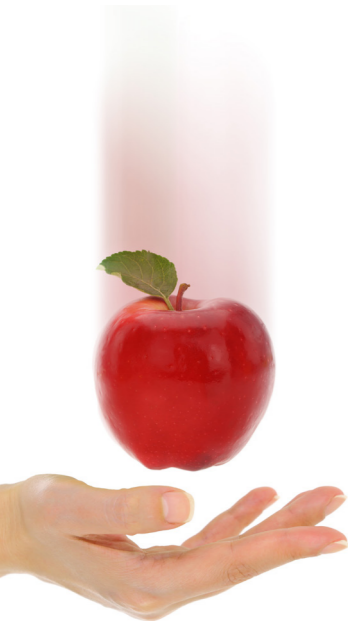
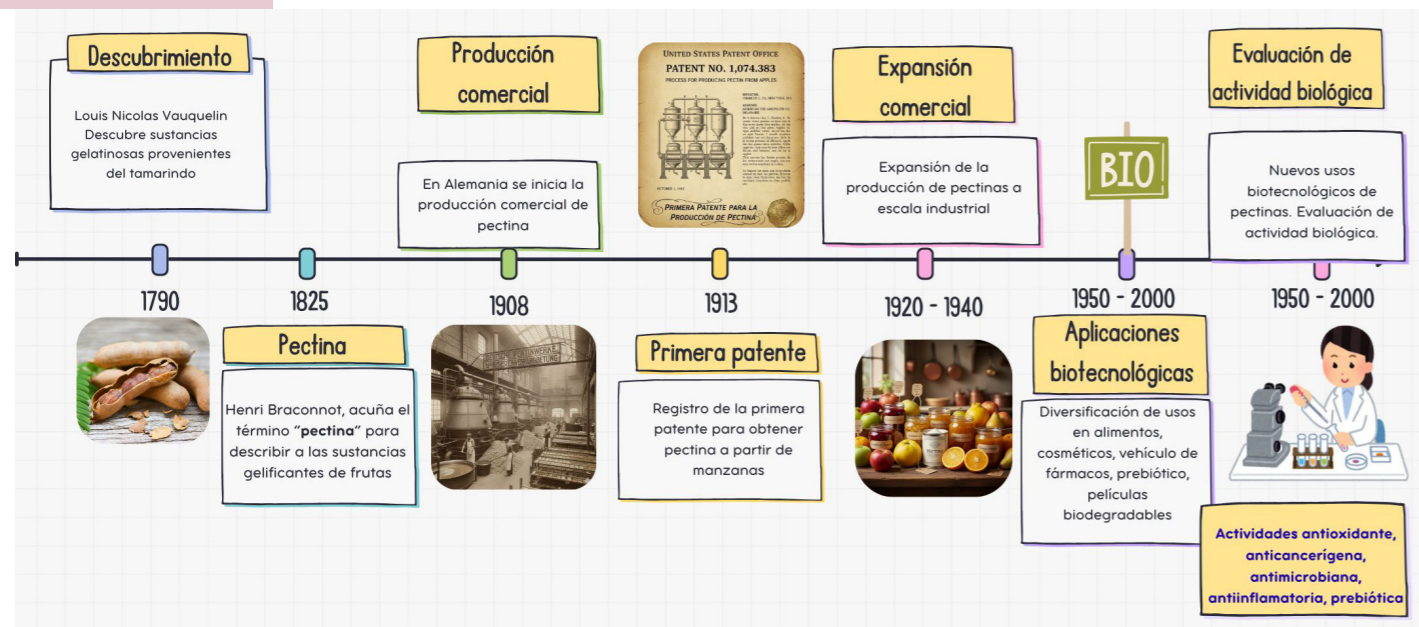
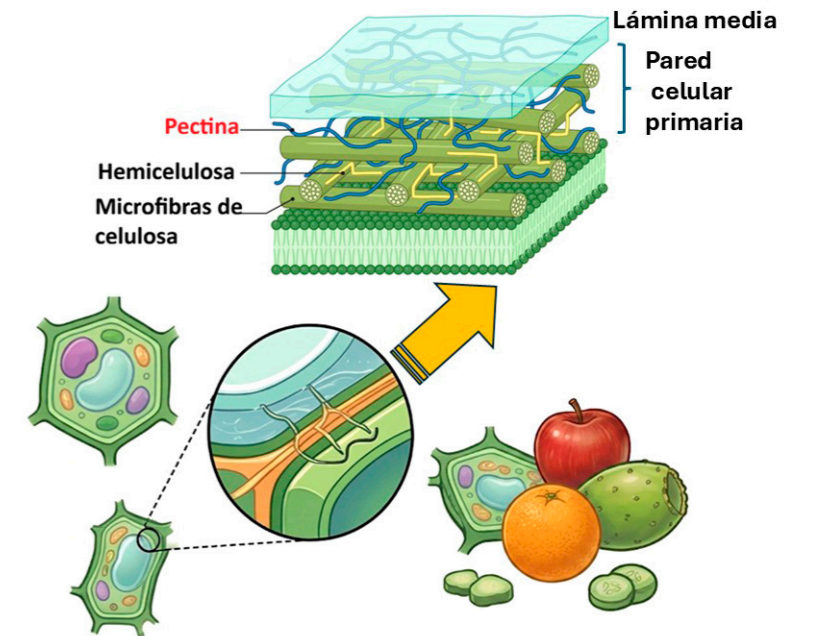


Figura 1. Cronología de las pectinas.



Las pectinas se consideran ingredientes naturales y seguros, han sido ampliamente evaluadas por autoridades regulatorias como la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU (FDA por sus siglas en inglés), la Comisión del Codex Alimentarius y el Comité mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA). Desde 1969, año en que se iniciaron las evaluaciones sobre la seguridad del consumo de pectinas en alimentos, se ha concluido que no hay preocupaciones de seguridad para la población general (Paulionis et al. 2015). A 200 años del reconocimiento de la pectina como macromolécula vegetal gelificante, esta gran familia de moléculas se considera uno de los ingredientes naturales más versátiles que continúa sorprendiendo a personas científicas y tecnólogas. Son biopolímeros multifuncionales con amplias aplicaciones biotecnológicas y biomédicas de alto valor agregado.

Figura 2. Representación de la composición macromolecular de una célula vegetal.



2 PECTINAS: UNA FAMILIA DE MACROMOLÉCULAS MUY COMPLEJAS

La pectina es un complejo de macromoléculas presente en células vegetales. Por su composición, predominantemente a base de carbohidratos o glúcidos, se denominan polisacáridos. La pectina está presente en la pared celular primaria y en la lámina media (Figura 2). En las plantas dicotiledóneas, en donde se incluyen la mayoría de los árboles, frutas y verduras (ejemplo: mango, manzano, peral, cerezo, girasol, zanahoria), la pectina representa alrededor del 35% de la pared celular; en las gramíneas (cebada, arroz, maíz, trigo, entre otras) se encuentra en proporciones del 2 al 10%, mientras que en tejidos leñosos, como los tallos, ramas y troncos de árboles y arbustos, su contenido es de aproximadamente 5% (Chandel et al. 2022). La pectina cumple diversas funciones dentro de la planta; una de ellas es su participación en la formación y fortalecimiento de las paredes celulares, lo que proporciona resistencia y soporte estructural. Además, desempeña un papel importante en el transporte de

iones a través de la pared celular, ya que influye en propiedades como la porosidad, la carga superficial, el pH y el equilibrio iónico (Voragen et al. 2009).

Estructuralmente, la pectina es una macromolécula formada por una cadena principal de un azúcar modificado con propiedades ácidas llamado ácido D-galacturónico (AGal). A esta cadena se le unen otras más pequeñas que forman ramificaciones, dando lugar a diferentes regiones o dominios estructurales (Figura 3) (Dang et al., 2025; Voragen et al., 2009):

- Homogalacturonano (HG): Es el dominio más simple y abundante, representa cerca del 60% de la molécula. Está formado por una cadena lineal de AGal, los cuales están unidos entre sí a través de enlaces glucosídicos α-(1→4). Los AGal pueden tener grupos metilo o acetilo unidos por enlaces éster, lo que influye en sus propiedades físicas y químicas.

- **Ramnogalacturonano I (RG-I):** Constituye entre el 20 y 30% de la pectina. Su cadena principal alterna AGal y ramnosa (Ram), y de esta estructura surgen cadenas laterales de galactosa y arabinosa, que aportan diversidad y funcionalidad a la pared celular.
- **Ramnogalacturonano II (RG-II):** Representa aproximadamente el 10% de la molécula, es el dominio más complejo y sofisticado. Posee una cadena principal de AGal con ramificaciones laterales variadas, que incluyen hasta doce tipos de azúcares, lo que le confiere una arquitectura esencial para las interacciones químicas y físicas de la pectina.
- **Xilogalacturonano (XGA):** Es menos abundante, compuesto por AGal con ramificaciones de xilosa.

han reconocido que el HG constituye el dominio más abundante dentro de la estructura global de la pectina. Un aspecto clave para comprender tanto la composición química como la funcionalidad de las pectinas es la proporción de grupos carboxilo de las unidades de AGal que se encuentran metil-esterificados, en comparación con el total de grupos carboxílicos presentes en la molécula. Este parámetro se conoce como grado de metil-esterificación (DM), dependiendo de este grado, las pectinas se clasifican en dos tipos: las que presentan un DM menor al 50% son denominadas pectinas de bajo metoxilo, y aquellas con un DM mayor al 50% se conocen como pectinas de alto metoxilo. Esta característica es fundamental porque determina su comportamiento tecno-funcional. Las pectinas de bajo metoxilo gelifican en presencia de iones de calcio, mientras que las de alto metoxilo requieren ambientes con alta acidez y una concentración elevada de solutos para formar geles. Estas últimas pectinas han sido ancestralmente usadas en confitería para elaborar mermeladas, ates y conservas de frutas.

La estructura y la cantidad de pectina pueden mostrar diferencias notables según el origen botánico de la fuente vegetal. Diversos estudios

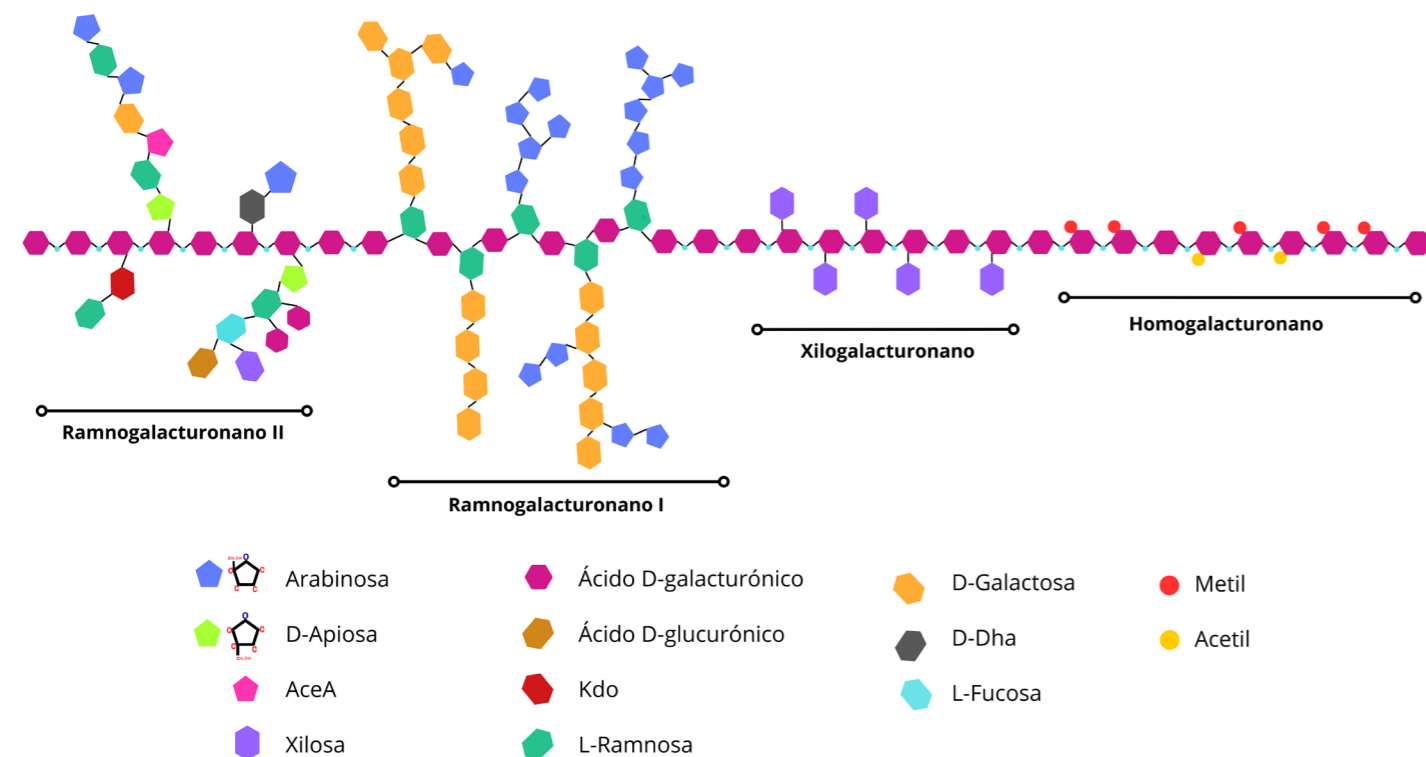


Figura 3. Representación de los cuatro dominios estructurales de las pectinas.

3 ¿CÓMO SE OBTIENEN LAS PECTINAS?

Desde hace más de un siglo, la pectina se ha extraído principalmente del orujo de las manzanas o cáscaras de cítricos, productos de desecho de la industria juguera. Sin embargo, el interés por aprovechar mejor los recursos naturales y reducir el impacto ambiental asociado al desperdicio de alimentos ha impulsado la búsqueda de nuevas fuentes de pectinas. El aprovechamiento de fuentes no convencionales de pectina se perfila como una estrategia ecológica y sostenible que impulsa la economía circular. Gracias a la investigación científica, es posible transformar residuos de frutas en pectinas con propiedades funcionales valiosas para la industria alimentaria, cosmética, farmacéutica e incluso la biomedicina. Así, la ciencia no solo mejora la calidad de los productos que consumimos, sino que también promueve un uso más eficiente de los recursos naturales. En los últimos años se han explorado fuentes de extracción no convencionales como cáscaras de mango, remolacha, pitahaya, tuna, xoconostle, papaya, melón, yuca y sandía, entre muchas otras, lo que permite aprovechar la biodiversidad de distintos ecosistemas y generar productos con mayor valor agregado (Figura 4) (Kalita et

al. 2025). Factores como el tipo de fruta, su grado de madurez y las condiciones de extracción afectan parámetros clave: contenido de ácido galacturónico, grado de metil-esterificación, nivel de ramificación y presencia de compuestos fenólicos. Estas variaciones modifican su capacidad gelificante, emulsificante y su posible actividad biológica (capacidad antioxidante, actividad antimicrobiana, anticancerígena, antiinflamatoria, etc.). Por ello, las pectinas no son todas iguales. Las obtenidas de cítricos y manzana son ampliamente utilizadas en alimentos por su capacidad para formar geles y estabilizar productos. En cambio, las extraídas de fuentes no convencionales —como cáscaras de frutas tropicales o especies del género *Opuntia*— se investigan por su potencial biotecnológico: antioxidante, antimicrobiano, prebiótico y como base para materiales biodegradables (Barrera-Chamorro et al. 2025; Morales-Martínez et al. 2018; Rodríguez-Hernández y Chavarría-Hernández, 2021). En el Cuadro 1 se presentan algunas fuentes de pectinas, junto con sus rendimientos de extracción y sus principales características o tecno-funcionalidad.



Figura 4. Algunas fuentes que se han explorado para la obtención de pectinas.

Fuente	Rendimiento de extracción (gpectina/100 gsólidos material vegetal)	Tecno-funcionalidad	Referencia
Manzana inmadura (<i>Spondias dulcis</i>)	6.8 a 23.3	Espesante, gelificante, estabilizante	Bhat et al. 2024
Orojo de manzana (<i>Malus pumila</i> , <i>Malus domestica</i> , <i>Spondias dulcis</i>)	14.6 a 23.3	Espesante, gelificante, estabilizante	Bhat et al. 2024; Ma et al. 2019
Cáscara de Limón (<i>Citrus limon</i>)	8.6 a 30.6	Espesante, estabilizante, sustituto de grasa, formadora de películas	Karim et al. 2022
Cáscara de Naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	3.0 a 31.2	Gelificante, estabilizante, espesante, formadora de recubrimientos	Iniguez-Moreno et al. 2024
Fuentes no convencionales			
Cabeza de girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	8.6 a 10.9	Estabilizante, emulsionante, espumante	Ezzati et al. 2020
Remolacha azucarera (<i>Beta vulgaris</i>)	24.6	Estabilizante, emulsionante	Fernández-Delgado et al. 2023
Cáscara de mango (<i>Mangifera indica</i> L.)	3.5 a 31.7	Estabilizante, formadora de películas de embalaje biodegradables	Karim et al. 2022
Papaya (<i>Carica papaya</i> L.)	5.8 a 20.2	Gelificante, espesante, estabilizante	Pedraza-Guevara et al. 2021
Cáscara de melón	2.9 a 29.0	Estabilizante, emulsificante, gelificante, encapsulante	Raji et al. 2017
Cáscara de sandía	14.2 a 19.3	Estabilizante, espumante, emulsificante, encapsulante	Petkowicz et al. 2017
Cáscara de Tuna (<i>Opuntia albicarpa</i>)	9.8 a 13.7	Gelificante, espesante, emulsionante	Lira-Ortiz et al. 2014; Morales-Martínez et al. 2018; Rodríguez-Hernández y Chavarría-Hernández, 2021
Tuna (<i>Opuntia robusta</i>)	14.6 a 15.7	Espesante, gelificante	Mota et al. 2020
Xoconostle o tuna ácida (<i>Opuntia matudae</i>)	10.5	Gelificante, espesante	Morales-Martínez et al. 2018
Yaca (<i>Artocarpus heterophyllus</i>)	12.5 a 14.9 25.4 a 35.1	Gelificante, modificador de textura	Li et al. 2019 Islam et al. 2023

Cuadro 1. Rendimientos de extracción y propiedades tecno-funcionales de pectinas obtenidas de distintas fuentes.

4

NUEVOS HALLAZGOS Y PERSPECTIVAS

La fuente y el proceso de obtención y purificación de pectinas impactan en su estructura y en sus propiedades tecno-funcionales, tales como la viscosidad de sus soluciones, la capacidad de formar geles, estabilizar suspensiones, formar emulsiones estables, encapsular compuestos lábiles o formar películas. Estas propiedades, además de su función como fibra dietética, han sido ampliamente utilizadas en la industria de los alimentos, en farmacia y en productos de cuidado personal. La pectina es una molécula usada como ingrediente natural, es un aditivo seguro sin límite de ingesta diaria y es uno de los pocos polisacáridos usado en medicina, en farmacia y en ingeniería biomédica. El interés científico en las pectinas es evidente a partir de la considerable cantidad de artículos y revisiones publicados en las últimas dos décadas. De acuerdo con la base de datos Web of Science, en el periodo de 2005 a 2025 se publicaron 358 artículos cuyo tema central fue pectinas. En el último lustro, el número de publicaciones se ha ampliado y México está entre los principales países en donde se realizan investigaciones concernientes a pectinas (Figura 5).

Las investigaciones recientes abordan la búsqueda de nuevas fuentes y métodos de extracción de pectinas, así como su caracterización bioquímica y fisicoquímica. Además, se examinan las propiedades bioactivas de diversas pectinas y sus polisacáridos estructurales. Diversos estudios han reportado los efectos positivos de los polisacáridos de pectina sobre la inmunidad intestinal. En el tracto intestinal, la fermentación de la pectina genera ácidos grasos de cadena corta que favorecen la salud intestinal y el peristaltismo, además de evidenciarse que la pectina funciona como una macromolécula prometedoras con propiedades antiinflamatorias e inmunomoduladoras para el alivio de la inflamación y la inhibición del desarrollo de tumores (Dang et al. 2025). No obstante, la complejidad estructural de las pectinas requiere una investigación más profunda para esclarecer la relación entre su estructura y función biológica.

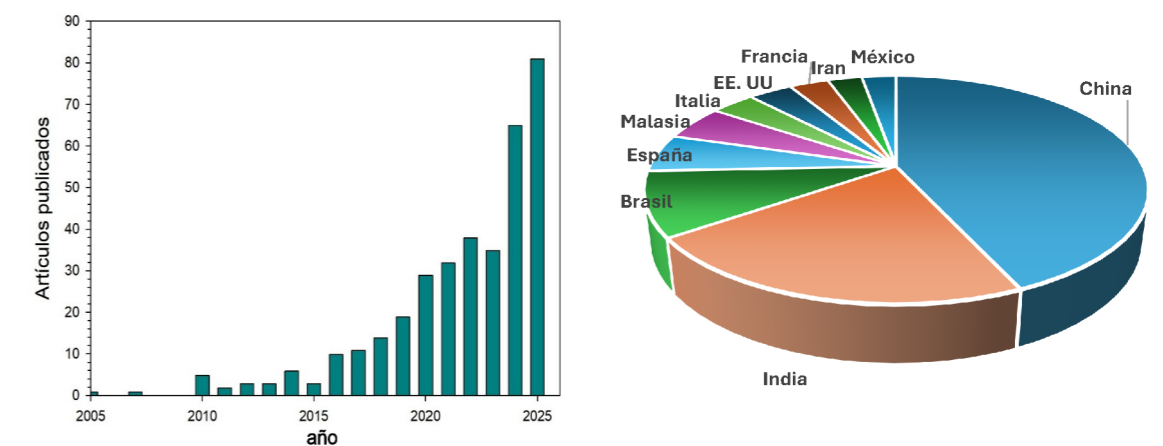


Figura 5. Número de publicaciones en las últimas dos décadas dedicadas a pectinas y principales países de origen de los autores para correspondencia. Datos obtenidos de la base de datos Web of Science (<https://clarivate.com>) el 20 de diciembre de 2025.

5 CONCLUSIÓN

Las pectinas son macromoléculas de origen vegetal, ancestralmente consumidas como parte de nuestros alimentos; se consideran aditivos alimentarios seguros y se están consolidando como ingredientes "naturales" o de etiqueta limpia que promueven la salud de los consumidores. En años recientes, se han investigado múltiples aplicaciones biotecnológicas de los polisacáridos pécticos, tales como vehículos para moléculas bioactivas, prebióticos y materiales para películas biodegradables. Además, diversos estudios han analizado sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, prebióticas y antitumorales. Sin embargo, las investigaciones futuras deberán explicarnos el papel de las pectinas en la promoción del bienestar general y su potencial en la prevención y tratamiento de enfermedades, lo cual deberá contribuir a la búsqueda y el uso de estas macromoléculas de base biológica, en la salud y en la alimentación humana.

6 AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) el financiamiento del proyecto CBF-2025-I-1581.



REFERENCIAS

- Barrera-Chamorro, L., Fernandez-Prior, A., Rivero-Pino, F., & Montserrat-de la Paz, S. (2025). A comprehensive review on the functionality and biological relevance of pectin and the use in the food industry. *Carbohydr Polym*, 348(Pt A), 122794. doi:10.1016/j.carbpol.2024.122794
- Bhat, M. I., Rashid, S. J., Ahmad, M. I., Rafiq, S., Fayaz, I., Mir, M. J., . . . Makroo, H. A. (2024). Comparative study on thermo-mechanical, structural and functional properties of pectin extracted from immature wasted apples and commercial pectin. *Int J Biol Macromol*, 254(Pt 1), 127658. doi:10.1016/j.ijbiomac.2023.127658
- Braconnot, M. H. (1825). Recherches sur un nouvel acide universellement répandu dans tous les végétaux. *Annales de Chimie et de Physique*, 28, 173 - 178.
- Chandel, V., Biswas, D., Roy, S., Vaidya, D., Verma, A., & Gupta, A. (2022). Current Advancements in Pectin: Extraction, Properties and Multifunctional Applications. *Foods*, 11(17). doi:10.3390/foods11172683
- Ciriminna, R., Chavarría-Hernández, N., Rodríguez-Hernández, A. I., & Pagliaro, M. (2015). Pectin: A new perspective from the biorefinery standpoint. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(4), 368-377. doi:10.1002/bbb.1551
- Dang, G., Li, J., Yin, C., Wang, W., Zhang, K., Zhong, R., . . . Schroyen, M. (2025). Deciphering Pectin: A Comprehensive Overview of Its Origins, Processing, and Promising Utility. *ACS Omega*, 10(1), 1-15. doi:10.1021/acsomega.4c01843
- Douglas, R. (1913). United States Patent No. United States Patent Office.
- Ezzati, S., Ayaseh, A., Ghanbarzadeh, B., & Heshmati, M. K. (2020). Pectin from sunflower by-product: Optimization of ultrasound-assisted extraction, characterization, and functional analysis. *Int J Biol Macromol*, 165(Pt A), 776-786. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.09.205
- Fernández-Delgado, M., del Amo-Mateos, E., Coca, M., López-Linares, J. C., García-Cubero, M. T., & Lucas, S. (2023). Enhancement of industrial pectin production from sugar beet pulp by the integration of surfactants in ultrasound-assisted extraction followed by diafiltration/ultrafiltration. *Industrial Crops and Products*, 194. doi:10.1016/j.indcrop.2023.116304
- Gobierno de México (2025). https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/pectic-substances-pectinates-and-pectates?utm_source=chatgpt.com
- Iniguez-Moreno, M., Pizana-Aranda, J. J. P., Ramirez-Gamboa, D., Ramirez-Herrera, C. A., Araujo, R. G., Flores-Contreras, E. A., . . . Melchor-Martinez, E. M. (2024). Enhancing pectin extraction from orange peel through citric acid-assisted optimization based on a dual response. *Int J Biol Macromol*, 263(Pt 1), 130230. doi:10.1016/j.ijbiomac.2024.130230
- Islam, M. R., Biswas, M. M., H., Esham, M. K. H., Roy, P., Khan, M. R., & Hasan, S. M. K. (2023). Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) by-products a novel source of pectin: Studies on physicochemical characterization and its application in soup formulation as a thickener. *Food Chemistry Advances*, 2. doi:10.1016/j.focha.2023.100273
- Kalita, P., Bhattacharjee, B., Pachua, L., & Roy, S. (2025). Recent trends in pectin sources, extraction, and active-edible coating applications. *Food Control*, 171. doi:10.1016/j.foodcont.2024.111105
- Karim, R., Nahar, K., Zohora, F. T., Islam, M. M., Bhuiyan, R. H., Jahan, M. S., & Shaikh, M. A. A. (2022). Pectin from lemon and mango peel: Extraction, characterisation and application in biodegradable film. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 4. doi:10.1016/j.carpta.2022.100258
- Li, W. J., Fan, Z. G., Wu, Y. Y., Jiang, Z. G., & Shi, R. C. (2019). Eco-friendly extraction and physicochemical properties of pectin from jackfruit peel waste with subcritical water. *J Sci Food Agric*, 99(12), 5283-5292. doi:10.1002/jsfa.9729
- Lira-Ortiz, A. L., Reséndiz-Vega, F., Ríos-Leal, E., Contreras-Esquivel, J. C., Chavarría-Hernández, N., Vargas-Torres, A., & Rodríguez-Hernández, A. I. (2014). Pectins from waste of prickly pear fruits (*Opuntia albicarpa* Scheinvar 'Reyna'): Chemical and rheological properties. *Food Hydrocolloids*, 37, 93-99. doi:10.1016/j.foodhyd.2013.10.018
- Ma, Y., Luo, J., & Xu, Y. (2019). Co-preparation of pectin and cellulose from apple pomace by a sequential process. *J Food Sci Technol*, 56(9), 4091-4100. doi:10.1007/s13197-019-03877-5
- Morales-Martínez, Y., López-Cuellar, M. d. R., Chavarría-Hernández, N., & Rodríguez-Hernández, A. I. (2018). Rheological behaviour of acetylated pectins from cactus pear fruits (*Opuntia albicarpa* and *O. matudae*). *Food Hydrocolloids*, 85, 110-119. doi:10.1016/j.foodhyd.2018.07.009
- Mota, J., Muro, C., Illescas, J., Hernández, O. A., Tecante, A., & Rivera, E. (2020). Extraction and Characterization of Pectin from the Fruit Peel of *Opuntia robusta*. *ChemistrySelect*, 5(37), 11446-11452. doi:10.1002/slct.202002181
- Paulionis, L., Walters, B., & Li, K. (2015). Authorised EU health claims on pectins. In *Foods, Nutrients and Food Ingredients with Authorised EU Health Claims: Volume 2* (pp. 153-174).
- Pedraza-Guevara, S., do Nascimento, R. F., Canteri, M. H. G., Muñoz-Almagro, N., Villamiel, M., Fernández-Ponce, M. T., . . . Ibañez, E. (2021). Valorization of unripe papaya for pectin recovery by conventional extraction and compressed fluids. *The Journal of Supercritical Fluids*, 171. doi:10.1016/j.supflu.2020.105133
- Petkowicz, C. L. O., Vriesmann, L. C., & Williams, P. A. (2017). Pectins from food waste: Extraction, characterization and properties of watermelon rind pectin. *Food Hydrocolloids*, 65, 57-67. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.040
- Raji, Z., Khodaiyan, F., Rezaei, K., Kiani, H., & Hosseini, S. S. (2017). Extraction optimization and physicochemical properties of pectin from melon peel. *J Biol Macromol*, 98, 709-716. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.146
- Rodríguez-Hernández, A. I., & Chavarría-Hernández, N. (2021). Novel pectins from prickly pear fruits (*Opuntia albicarpa*): structural features and rheological properties. In *Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications*: Springer International Publishing.
- Vauquelin, M. (1790). Analyse du Tamarin, et Réflexions fur quelques-unes de fes Préparations médicinales. *Annales de Chimie*, 50, 92 - 106.
- Voragen, A. G. J., Coenen, G. J., Verhoef, R. P., & Schols, H. A. (2009). Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. *Structural Chemistry*, 20(2), 263-275. doi:10.1007/s11224-009-9442-z