

VOLUMEN 4 NO. 1 | MARZO 2026



Biotecnológica®

Magazine

**Huanglongbing
(HLB): Retos y
Soluciones en la
Citricultura
Moderna**

Felipe Ascencio y Gracia A. Gómez
Anduro

**Vinagre: Una
fuente natural,
biodegradable y
económica de
celulosa bacteriana**

Abigail María Díaz Guerrero y Ana
Beatriz Morales Cepeda*



BIOTECNOLÓGICA MAGAZINE® año 2026, Vol. 4, No. 1, enero-febrero, es una publicación de divulgación, bimestral, editada por: Dra. Norma Y. Hernández Saavedra. <http://biotmagazine.com>, biotecnologicamagazine@gmail.com. Blvd. Constituyentes 1975, L19 MzB 165, Fracc. Campestre, La Paz, Baja California Sur, C.P. 23090, México. Tel. (612) 12 40674. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2024-022911435400-102, ISSN: 2992-863X; ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. El contenido de los artículos y comunicaciones es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista del Editor ni del Consejo Editorial Fundador. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa del Consejo Editorial Fundador.

Crédito Fotografía Portada: Kamchatka a través de canva

Edición gráfica editorial y página web: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez.

ORGANISMO RESPONSABLE

Biotechnológica Magazine

Editores en Jefe

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra
Dr. Felipe Ascencio Valle

Consejo Editorial Fundador

Dra. Norma Y. Hernández Saavedra
Dr. Felipe Ascencio Valle
Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Editora Ejecutiva

Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Revista digital de divulgación científica.

Biotechnológica Magazine es la revista en línea de divulgación biotecnológica dirigida a empresas, investigadores, estudiantes y a todos los que sientan curiosidad por esta innovadora área científica y tecnológica.

Biotechnológica Magazine publica artículos en el campo de la biotecnología y ciencias afines. Publica editoriales (mensaje de el o los editores), artículos, notas cortas, fotografías, infografías, y noticias de actualidad en áreas gubernamentales, académicas, empresariales e investigaciones destacadas en el campo de la biotecnología, ciencias biológicas, ciencias de la vida, y ciencias ambientales, acuícolas, agropecuarias, veterinarias y ciencias médicas y biofarmacéuticas.

Índice

1

MANUAL PARA LA PRODUCCIÓN DE CHILTEPÍN DE TRASPATIO

Gracia A. Gómez Anduro*, Crystal A. Guluarte Vélez, Saúl E.
Briseño Ruíz

7

EL ENEMIGO SILENCIOSO DEL AGUACATE: PHYTOPHTHORA CINNAMOMI

Sergio Heredia Mora, Gamaliel Valdivia Rojas*

15

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SEGURIDAD ALIMENTARIA: ALGUNAS SOLUCIONES BASADAS EN BIOTECNOLOGÍA

Norma Y. Hernández Saavedra

29

VINAGRE: UNA FUENTE NATURAL, BIODEGRADABLE Y ECONÓMICA DE CELULOSA BACTERIANA

Abigail María Díaz Guerrero y Ana Beatriz Morales Cepeda*



35

HUANGLONGBING (HLB): RETOS Y SOLUCIONES EN LA CITRICULTURA MODERNA

Felipe Ascencio y Gracia Gómez-Anduro

49

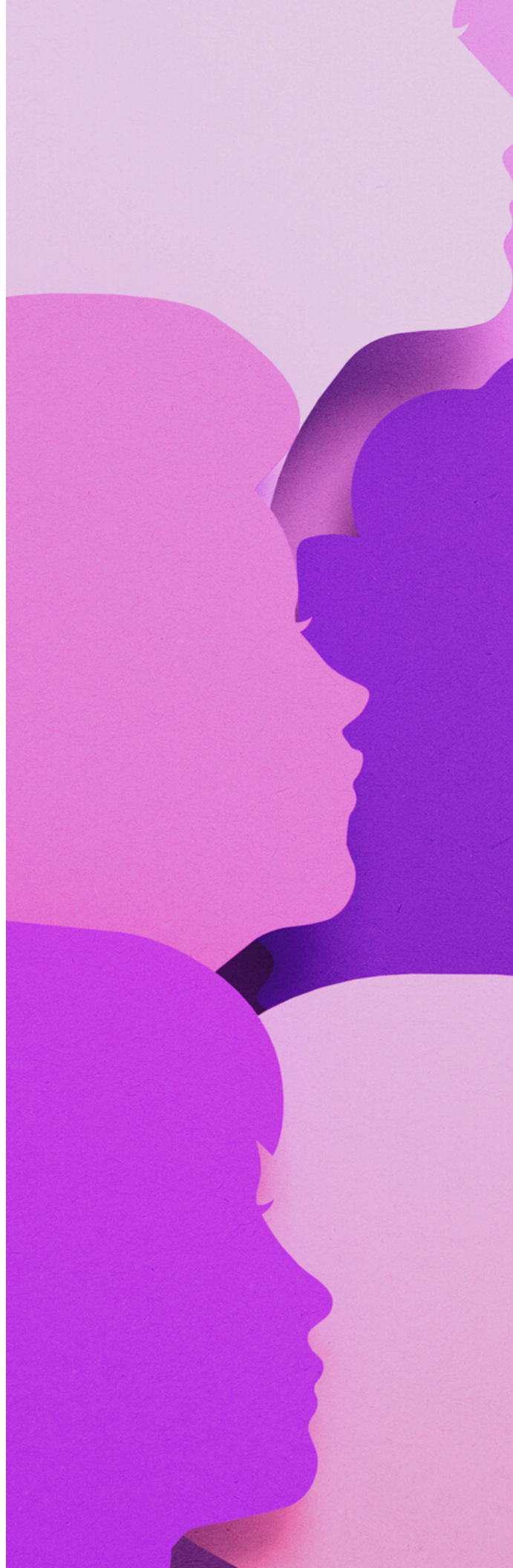
PIES DE LOTO

Arturo Sánchez Paz

55

INFOGRAFÍA. CHILTEPIN DE TRASPATIO

Gracia Alicia Gómez Anduro, Saúl Edel Briseño Ruíz, Daniela
Núñez García, Carolina Sánchez Verdugi





Notas del Editor

Iniciamos el 2026 con una nueva edición de BiotecnoLógica Magazine, reafirmando nuestro compromiso con la divulgación científica accesible, crítica y relevante para los desafíos contemporáneos. En un contexto global marcado por la presión sobre los sistemas alimentarios, la pérdida de biodiversidad, el cambio climático y la necesidad de innovaciones tecnológicas sostenibles, la biotecnología se posiciona como una herramienta clave para comprender y enfrentar estos retos.

Los artículos que integran este número reflejan justamente esa diversidad de enfoques que caracterizan a la biotecnología moderna: desde la conservación de recursos bioculturales hasta el desarrollo de soluciones tecnológicas sustentables, pasando por el manejo de enfermedades agrícolas y la generación de biomateriales de alto valor.

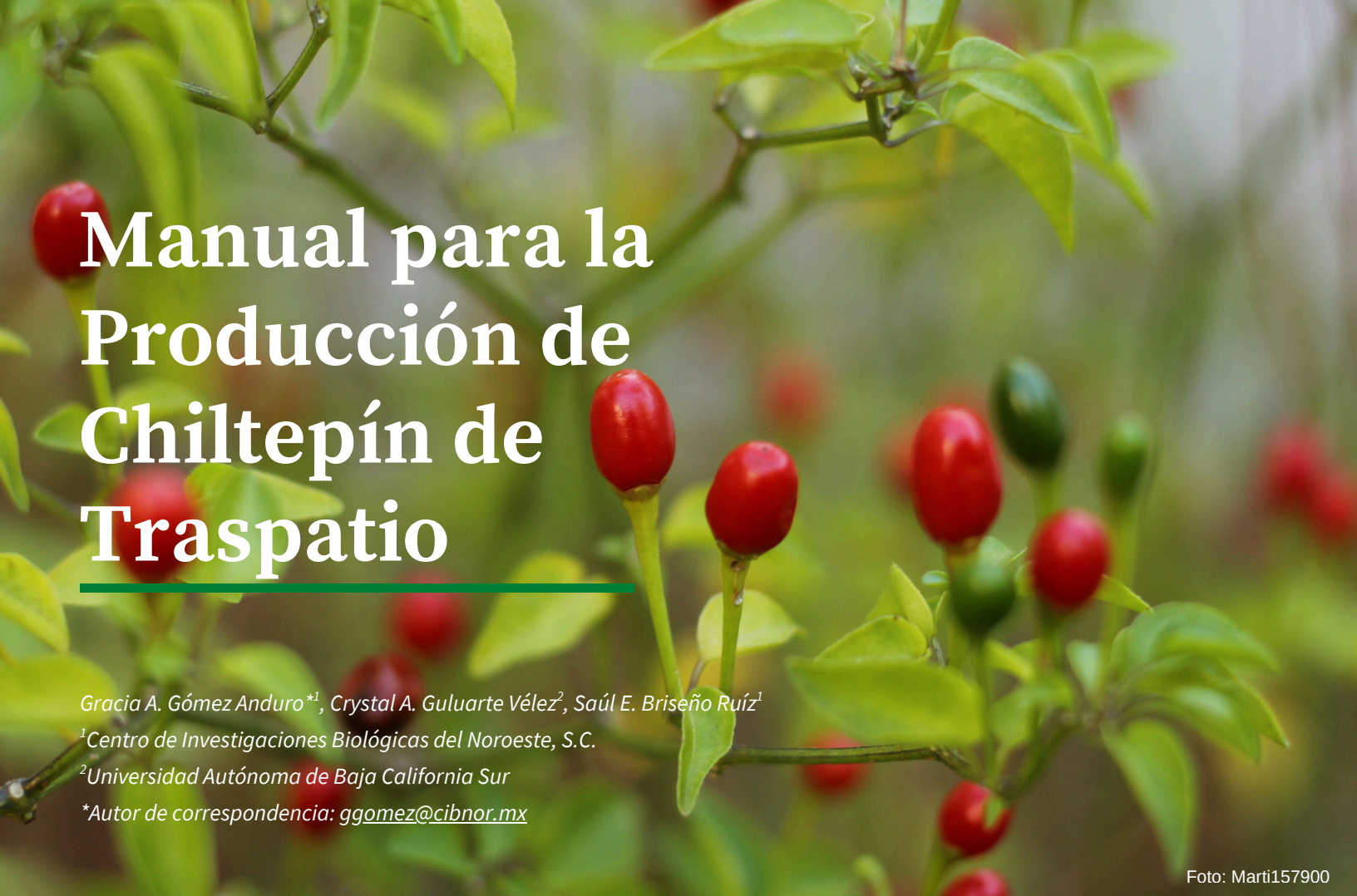
Así mismo, se integra una reflexión que nos invita a pensar críticamente sobre el concepto de empoderamiento femenino. Más allá de considerarlo una solución simplista a los problemas

sociales, el texto plantea que reconocer y garantizar el lugar que las mujeres merecen en la sociedad no solo es una cuestión de justicia, sino también una vía para construir comunidades más equitativas, creativas y resilientes.

Con esta edición inauguramos un nuevo año editorial convencidos de que la ciencia no solo debe producir conocimiento, sino también compartirlo, contextualizarlo y ponerlo al servicio de la sociedad. Esperamos que los temas reunidos en este número inviten a la reflexión, despierten curiosidad y, sobre todo, fortalezcan el diálogo entre ciencia, tecnología y sociedad.

Les invitamos a seguir explorando, cuestionando y compartiendo la biotecnología que está transformando nuestro mundo.

Comité Editorial
BiotecnoLógica Magazine



Manual para la Producción de Chiltepín de Traspatio

Gracia A. Gómez Anduro^{*1}, Crystal A. Guluarte Vélez², Saúl E. Briseño Ruíz¹

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

²Universidad Autónoma de Baja California Sur

*Autor de correspondencia: ggomez@cibnor.mx

Foto: Martí157900

Tema

Ante la disminución de las poblaciones silvestres de chiltepín, el cultivo en traspatio surge como una alternativa viable para su conservación y aprovechamiento sustentable. En este manual se aborda el manejo de *Capsicum annuum* var. *glabriusculum* integrando aspectos botánicos, ecológicos y culturales de la especie. Se describen lineamientos técnicos para su germinación, manejo agronómico, nutrición y producción de fruto en sistemas domésticos adaptados a regiones áridas y semiáridas.

1.Introducción

El chiltepín es un chile pequeño y muy picante, perteneciente a la especie *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*. Crece silvestre en zonas de América, desde Arizona hasta Sudamérica, y es muy apreciado en la cocina mexicana, es el ancestro silvestre de la mayoría de los chiles domesticados. Su nombre proviene del náhuatl *chīltēpin* (*chīlli* = chile, *tepin* = pequeño/pulga). Es originario de

Mesoamérica y ha sido recolectado desde hace más de 6,000 años (Bosland & Votava, 2012). En el Desierto Sonorense, las comunidades Yaquis, Mayo, Seri y Pima lo han usado como alimento, medicina y en rituales (Nabhan, 1990). Actualmente es símbolo gastronómico del norte de México y forma parte de la identidad cultural y culinaria de Sonora, Sinaloa y Chihuahua.

2.La planta de chiltepín

Crece como arbusto de hasta 1.5 metros de altura, con tallos ramificados y hojas lanceoladas. Florece durante las temporadas cálidas y se poliniza principalmente por insectos. Es resistente a condiciones de sequía moderada y suele encontrarse en laderas, matorrales y zonas perturbadas. Se caracteriza por producir frutos pequeños (6–8 mm de diámetro), redondos, de color verde que se tornan rojo brillante al madurar, y con un sabor extremadamente picante. Su cultivo tradicional es de importancia cultural para comunidades del desierto

Sonorense, y su fruto se utiliza como condimento, en medicina tradicional y como parte de la dieta regional.

3. Características botánicas

Nombre científico: *Capsicum annum* var. *Glabriusculum* (Fig. 1)

- Familia: Solanaceae
- Altura: 0.8–1.5 m
- Tipo: Arbusto perenne en climas cálidos, anual en zonas frías
- Fruto: Redondo, 4–8 mm, verde al inicio y rojo brillante al madurar
- Flor: Blanca, 1–1.5 cm, hermafrodita
- Picor: 50,000–100,000 SHU en la escala Scoville (muy picante)
- Ciclo de vida: 3–5 años en condiciones favorables
- Hábitat natural: matorrales, bordes de bosque tropical seco, laderas pedregosas.



Figura 1. Etapas de maduración del chile chiltepín.

4. Clima y ubicación

Crecen muy bien en el Noroeste de México, requiere suelo franco arenoso con clima cálido-seco o semiárido y con iluminación al menos 6 h al día y posterior ciclo de oscuridad (Tabla 1).

La temperatura ideal del chiltepín silvestre es de 18 a 35°C. En CIBNOR se ha trabajado desde 2018 en la selección de una línea de chiltepín de alta producción resistente a salinidad, sequía y altas temperaturas (45–48°C) y a partir de 2023 en documentar el manejo agronómico del cultivo de chiltepín a cielo abierto. Actualmente, trabajamos en la selección de una línea de chiltepín resistente a frío, pues es sensible a fríos extremos como los del Norte de Sonora.

NOTA IMPORTANTE

El chiltepín es muy sensible al cloro del agua de la red pública o servicio de agua potable. Se recomienda usar filtros de carbón activado o dejar el agua al sol de 24 a 48 h antes de regar, para evaporar el cloro. De lo contrario, a los 6 a 8 meses de crecimiento, a planta empezará a tirar hojas y secarse.

Tabla 1. Parámetros a considerar para el cultivo de chiltepín.

Factor	Requerimiento ideal	Referencia
Clima	Cálido a semiárido, 20–35 °C	CONABIO, 2013
Luz	Pleno sol, 6–8 h diarias	Bosland & Votava, 2012
Suelo	Suelto, bien drenado, rico en materia orgánica	FAO, 2010
pH	6.0–7.0	FAO, 2010
Agua	Moderada, sin encharcar	CONABIO, 2013
Altitud	0–1,800 m s.n.m. 2024 y 2025 se tienen evidencias de cultivos a más de 2,800 m s.n.m.	Nabhan, 1990 Biol. Efraín Payán (comunicación personal)

5. Cultivo de traspatio

5.1. Materiales necesarios

- Semillas de chiltepín
- Charolas de 200 cavidades (sugerimos de hielo seco blanco porque las negras de plástico limitan el crecimiento de raíz) o directamente en maceta.
- Tierra fértil/sustrato/tierra compostada
- Se requiere 1 m² de tierra por planta o macetas grandes (mínimo 40 cm profundidad)
- Se recomienda suelo franco, migajón-arenosos y arcillosos, con un buen drenaje y pendiente adecuada (alrededor de un 4–8%), pH 6.0 a 7.0.
- Regadera con rociador fino
- Tijeras de poda
- Cercar el terreno para evitar que la fauna silvestre dañe las plantas y colocar trampas amarillas adhesivas para monitoreo de insectos y plagas.

6. Germinación de semillas de chiltepín

1. Abrir el fruto rojo (seco) y recolectar semillas
2. Poner las semillas en agua y eliminar las que flotan, las semillas viables son las que se van al fondo.
3. Lavar las semillas que se fueron al fondo con una solución de agua con cloro en partes iguales (1:1) durante 10 minutos.
4. Lavar 2 veces con agua.
5. En una charola de 200 cavidades o en una maceta, poner tierra fértil/sustrato/tierra compostada.
6. Colocar 1 semilla por cavidad a aproximadamente a 1 cm de profundidad, cubre con poca tierra y al final con vermiculita
7. Mantén humedad ligera regando diariamente con aspersor.
8. Coloca en zona cálida (25–30 °C), la germinación se realiza en obscuridad, por lo que una vez regadas las charolas sugerimos cubrir con una bolsa de plástico negro. Hay que tener cuidado en verano de que no se queme la semilla con el calor.
9. El tiempo de germinación varía dependiendo la temperatura, a 25-26°C tarda 6 días en germinar, a menos de 20°C puede tardar más de 10 días.
10. Cuando se observe que las semillas están germinando hay que destaparlas para que tomen el sol y puedan enderezarse y crecer.
11. Las plántulas deberán mantenerse con riego diario (aproximadamente 1L por charola con buen drenaje) y nutrición durante aproximadamente 3 meses.

7. Trasplante

Cuando la plántula alcance una altura de 10–15 cm y la radícula se desprenda fácilmente de la charola, es momento de pasarla a suelo.

Tome en cuenta que 1 planta requiere aproximadamente 1 m² de espacio para crecer óptimamente.

1. Cuidados básicos

- Deshierbar regularmente
- Fertilización

Figura 3. Planta de chiltepín en producción de traspatio.



Figura 2. Siembra de chiltepín en charola de 200 cavidades.

- Poda ligera al finalizar cada periodo de pizca, asegurando que se separen los surcos y las plantas.
- Sugerimos cerca perimetral para evitar daño por animales

2. Cuidados

- Riego: Diario en las 2 primeras semanas de trasplante, después cada tercer día.

*Nota: En verano se pueden requerir 2 riegos al día



Tabla 2. Recomendaciones de manejo durante las fases de germinación y desarrollo de plántula de Chiltepín.

Fase	Sugerencia
Germinación (en charolas de unicel de 200 cavidades)	Invierno: Requiere 1 L de agua por charola aproximadamente. Verano: Puede requerir 2 riegos de 1L por charola (mañana y tarde). Utilizar sustrato, tierra compostada, humedecer con agua de pozo y dejar escurrir. Colocar 1 semilla por pozo. Si coloca más, no crecerán óptimamente por competencia del espacio y se secarán. Cubrir con plástico durante 5 a 7 días (temperaturas de 25 a 37°C), 10-14 días en temperaturas menores a 25°C. En ésta fase la planta solo necesita agua, no necesita agregar ningún nutriente. En cuanto aparezca la planta, descubrir y poner al sol para que la plántula crezca con luz natural.
Plántula. Aparecen las primeras hojas verdaderas	Al aparecer las primeras hojas verdaderas puede agregar enraizador (2g/L de agua). Se recomienda revisar la etiqueta del producto. Al mes, puede agregar nutrición que contenga micronutrientes y nitrógeno. Nosotros usamos Tricel® 20:3 que contiene Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), y aminoácidos en aplicaciones foliares semanales hasta llevar al campo en dosis al 0.1-0.3%. Importante: La aplicación se realiza muy temprano por la mañana (es más eficiente porque los estomas están abiertos) o por la tarde para evitar quemar la planta con el producto y el sol. Se sugiere además aplicar productos antihongos. Nosotros usamos: Previcur® y Derosal®. Puede hacer una sola mezcla con ambos y aplicar. Previcur® (Propamocarb): Fungicida preventivo, sistémico, importante para evitar el “damping-off” o el estrangulamiento del tallo. Se disuelve 1.5 ml/L de agua y se sumerge la charola hasta llegar a la primera hoja verdadera, posterior a eso sacar y dejar escurrir. Derosal® (Carbendazim): Es un fungicida sistémico de amplio espectro. Se disuelve 0.5 g/L (revisar dosis en etiqueta del producto) y se sumerge la charola hasta llegar a la primera hoja verdadera, posterior a eso sacar y dejar escurrir. SE DEBE SER CUIDADOSO CON LAS DOSIS PORQUE PUEDE DAÑAR LA PLANTA. SUGERIMOS PROBAR USANDO DE 1/8 A 1/4 DE LA DOSIS MÍNIMA RECOMENDADA EN LA ETIQUETA DEL PRODUCTO.

8. Nutrición y cosecha

En la Tabla 3 se detalla el manejo nutricional del chiltepín durante su etapa productiva. En términos de cosecha, esta se iniciará a los 90–120 días después de la siembra.

- Frutos maduros: color rojo brillante.
- Frutos rojos: se secan para conservar; frutos verdes se preparan curtidos.

9. Usos del chiltepín

- Gastronomía: salsa, encurtidos, condimento seco
- Medicinales: estimulante digestivo
- Cultural: ingrediente tradicional en muchas regiones del norte de México

10. Recomendaciones ecológicas

- No sobreexplotar si se recolecta silvestre
- Fomentar el cultivo doméstico
- Conservar semillas locales

Tabla 3. Manejo nutricional del chiltepín en etapa productiva.

Fase		Sugerencia
Planta	NUTRICIÓN DEL PRIMER CUATRIMESTRE	Mes 1: Crecimiento de la plata. Aplicar triple 19 o 20 (N-P2O5-K2O), enraizador (2 g/L) y nitrógeno (5 g/L de agua). Mes 2: Crecimiento foliar y floración. Mantener aplicación semanal de: enraizador, nitrógeno, agregar sulfato de potasio (5 g/L), triple 19 o 20 (5 g/L). Aplique magnesio y Calcio (5 g/L) cuando la flor esté abierta, así evitará aborto y dará fuerza al fruto. Inicio de floración aplicar Foliar: Aplicar 1 vez por semana Tricel 20:3 en aplicaciones foliares al 0.1-0.3% y giberelina. Si notas que la nutrición no es uniforme, es decir, hay plantas amarillentas, puedes agregar 20 g de Triple 17 (VERDIL 17-17-17*) o similar granulado cerca de la planta para que se disuelva durante el riego.
Planta en producción de fruto		General: Fertilización 1 vez por semana con urea, ácido fosfórico (puede ser que solo lo encuentre en presentaciones muy grandes, por lo que puede remplazarlo por un mejorador de suelo) calcio, potasio (5 g/L) durante la producción de fruto. Mes 3: Floración y producción de fruto. Se puede pizar chiltepín verde. Triple 19 o 20, nitrógeno (10 g/L), calcio (10 g/L), magnesio (10 g/L), sulfato de potasio (10 g/L). Si el suelo se siente muy compacto agregar un mejorador de suelo. Aplicación Foliar: Hormona giberelina para el amarre de fruto, aplicación semanal, no más de 3 semanas porque puede deformar el fruto y desgastar la planta. Mes 4: Maduración de fruto e inicio de pizca de chile rojo. Para inducir la madurez se estresa a la planta bajando el riego y nutrición, es decir, en lugar de regar cada tercer día, se riega 1 vez por semana (cuidando que las hojas no pierdan turgencia).
Poda y preparación de planta para el siguiente ciclo		Al finalizar la pizca, cerramos éste primer ciclo de producción con una poda muy ligera (10%) para eliminar brazos con chile seco o dañados. Después del primer año sugerimos podar al 30% cuidando la separación entre las plantas y surcos. Se sugiere aplicación foliar de cobre para sellar heridas después de la poda, esto evitará enfermedades fungosas. Se repite el ciclo de nutrición a partir de “crecimiento foliar y floración” Con éste manejo agronómico usted tendrá fruto en 3 periodos del año (Gómez-Anduro, et al., 2023): Verano: Julio-agosto; Invierno: Diciembre-enero y Primavera: Marzo-abril. Aunque la planta puede vivir más de 5 años, la mejor producción es en los 3 primeros años, posteriormente empieza a bajar la producción. Primera pizca: de 80 a 100 g de chiltepín por planta Segunda y tercera pizca: 120-150 g por planta Plantas de 2 años: Hemos observado hasta 250 g por planta

Agradecimientos

Lic. Carolina Sánchez Verdugo y Daniela Núñez García por la vinculación y difusión del trabajo en sectores vulnerables; A la C. Laura Isela Ruiz Romero y Benita Ana Karina Reyes Martínez, responsables de Centros de Desarrollo comunitario (CDC) de ejidos Chametla y El Centenario; A personal de campo CIBNOR: Adrián Jordán Castro, Raymundo Ceseña Núñez y Pedro Luna García.

Referencias

1. Bosland, P. W., & Votava, E. J. (2012). Peppers: Vegetable and spice capsicums (2nd ed.). CABI.
2. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2013). Fichas de especies prioritarias: Capsicum annuum var. glabriusculum. <https://www.conabio.gob.mx>
3. Gómez-Anduro, E. G., Payan-Cázares, E., Hernández-González, J., & Melero-Astorga, J. M. (2023). Chiltepín: El oro rojo del desierto sonoreño. Biotmagazine, 1(5), 6-10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10479476>
4. Nabhan, G. P. (1990). Chiltepín: A spicy little pepper with deep roots in the borderlands. Desert Plants, 10(3), 132-137.
5. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2010). Producción de cultivos hortícolas en pequeña escala. FAO. <https://www.fao.org>

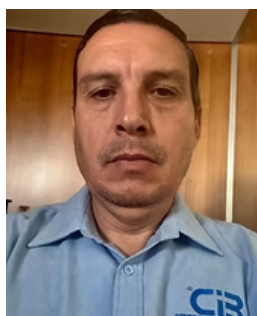
Sobre los autores



Gracia Alicia Gómez Anduro. Investigador Titular del Programa de Agricultura en Zonas Áridas del CIBNOR. Interesada en la aplicación de ciencias, desarrolla líneas de investigación de herramientas moleculares para la detección de material genético de patógenos, optimización y manejo de cultivos de interés agrícola.



Crystal Alejandra Guluarte Vélez. Doctora en ciencias en el Uso Manejo y Preservación de los recursos naturales con especialidad en Inmunología, Microbiología y Biología Molecular. Saúl Edel Briseño Ruiz. Ingeniero Agrónomo especialista en manejo de hortalizas y manejo integrado de plagas y enfermedades, es responsable del campo agrícola en el programa de Agricultura en Zonas Áridas del CIBNOR.



Saúl Edel Briseño Ruiz. Ingeniero Agrónomo especialista en manejo de hortalizas y manejo integrado de plagas y enfermedades, es responsable del campo agrícola en el programa de Agricultura en Zonas Áridas del CIBNOR.

Cita:

Gómez Anduro, G. A., Guluarte Vélez, C. A., & Briseño Ruiz, S. (2026). Manual para la producción de Chiltepín de traspatio. Biotecnológica Magazine, 4(1), 7-12. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19071470>



El enemigo silencioso del aguacate: *Phytophthora cinnamomi*

Sergio Heredia Mora, Gamaliel Valdivia Rojas*

Maestría en Agrobiotecnología. Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes. Tecnológico Nacional de México.

Autor de correspondencia: gamaxew@gmail.com

Foto: CnvStudios

Tema

En los sistemas de monocultivo, la incidencia de plagas y enfermedades que merman la producción es frecuente. En Michoacán, un ejemplo relevante es la denominada "tristeza del aguacate", causada por el Oomiceto *Phytophthora cinnamomi*, la cual afecta significativamente la productividad del cultivo. Una estrategia de manejo eficiente y sostenible consiste en la utilización de agentes de control biológico, como bacterias y hongos antagonistas. Esta alternativa permite suprimir al patógeno, a la vez que contribuye a mejorar la salud del suelo y reduce la dependencia a los fungicidas de síntesis química.

1.Introducción

El cultivo de aguacate en Michoacán representa uno de los pilares económicos y sociales más importantes en el estado y en país, no solo por su impacto en las exportaciones, sino también por el sustento que brinda a miles de familias. Sin

embargo, enfrenta una amenaza silenciosa: la "tristeza del aguacate" enfermedad que afecta a una amplia gama de especies arbóreas en distintos continentes, como el aguacate en América, los robles en Oceanía y los castaños en Europa. Es un pseudohongo (oomiceto) capaz de sobrevivir en el suelo por años y colonizar rápidamente las raíces, provocando la obstrucción de los vasos conductores, estrés hídrico, pérdida de vigor y disminución drástica en la productividad de los huertos. Las medidas de control químico disponibles han mostrado una eficacia limitada, además de generar problemas colaterales como la degradación y contaminación del suelo. Ante este panorama, la búsqueda de alternativas sustentables se vuelve prioritaria. En este artículo se explora el potencial de hongos y bacterias asociadas a raíces (rizosféricas) benéficas, que actúan como antagonistas naturales de *P. cinnamomi*. Estos microorganismos no solo inhiben el crecimiento del patógeno, sino que también mejoran la salud del suelo y fortalecen la resistencia de las plantas,

representando una estrategia biotecnológica regenerativa. Su implementación constituye una opción viable para reducir el uso de agroquímicos, recuperar la biodiversidad de los suelos (edáfica) y asegurar la sostenibilidad del cultivo de aguacate en beneficio de productores, consumidores y del medio ambiente.

1.Comportamiento epidemiológico de la tristeza del aguacate

La tristeza del aguacate, causada por *P. cinnamomi*, representa una de las enfermedades más destructivas y de mayor impacto económico en la producción de aguacate a nivel mundial. Bajo condiciones favorables, puede afectar hasta el 75% de las huertas comerciales, provocando pérdidas millonarias cada año. Desde su detección en la década de 1940, su presencia se ha extendido rápidamente a casi todas las regiones productoras de aguacate del mundo. En América Latina, ha ocasionado la pérdida de vastas áreas de cultivo en países como México, Perú, Colombia, Chile y Ecuador, con reducciones significativas tanto en la densidad de árboles como en la producción total. De igual manera, Estados Unidos, Australia, Sudáfrica, España e Israel han reportado graves brotes epidémicos, afectando miles de hectáreas. Actualmente, la enfermedad está presente en todos los continentes donde se cultiva aguacate, consolidándose como una amenaza global para la sostenibilidad del sector (de Andrade Lourenço et al., 2022).



Foto: Eufenef

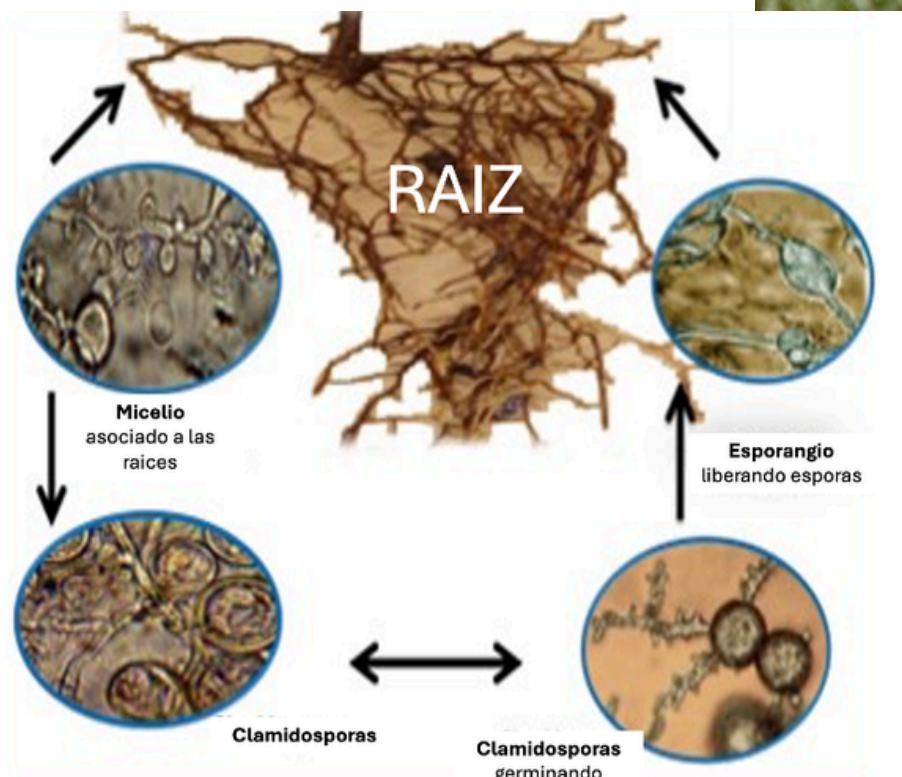


Figura 1. Detalle de los efectos de *P. cinnamomi* en las raíces de un árbol de aguacate (Imagen modificada a partir de Andrade-Hoyos et al., 2012)

En 1942, Tucker logró aislar por primera vez el patógeno en plantas de aguacate en Puerto Rico. Años más tarde, en México se registró el primer brote importante en 1952, ocasionando pérdidas de hasta el 90% de la producción. Desde entonces, la enfermedad se ha propagado a distintas regiones del mundo, donde, bajo condiciones favorables, ataca las raíces y la base del tronco, invade los tejidos vasculares y extrae los nutrientes necesarios para su desarrollo, el cual está influenciado por factores como la temperatura, humedad, precipitación, pH, textura y fertilidad del suelo (Agapito-Amador et al., 2022). *Phytophthora cinnamomi* es un Oomiceto eucarionte clasificado dentro del grupo de los protistas. Su estrategia de alimentación es versátil: puede comportarse como saprófito, biótrofo, hemibiótrofo o necrótrofo. Esto significa que puede nutrirse de materia orgánica muerta, pero también infectar plantas vivas. En este caso, primero extrae nutrientes del tejido vegetal sin matarlo de inmediato (fase biotrófica). Luego, al culminar esta fase, causa la muerte del tejido (necrosis) y continúa alimentándose de los restos (fase necrotrófica). En resumen, infecta al huésped, lo mata de forma gradual y finalmente se alimenta de él (Hardham, 2005).

3. Fisiología del parasitismo

Phytophthora sp. cuenta con estructuras de resistencia como clamidosporas, esporangios y oosporas, que le permiten sobrevivir de manera saprófita en el suelo. La fase de infección comienza

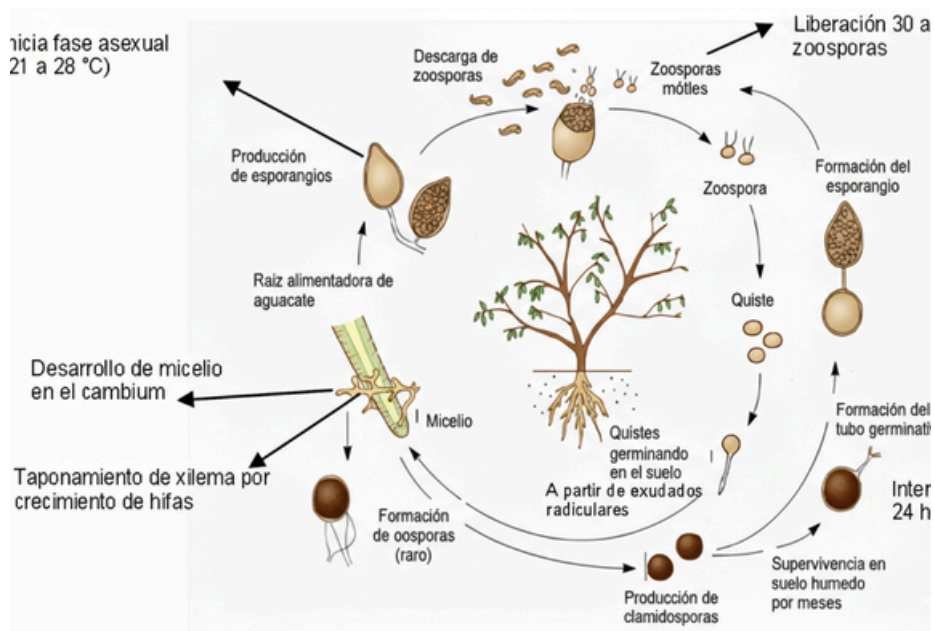


Figura 2. Ciclo de vida de *Phytophthora cinnamomi*. (Imagen modificada a partir de Agapito-Amador et al., 2022)

cuando las zoosporas, liberadas del esporangio, son atraídas por los exudados de las raíces y sus pelos radiculares (Fig. 1; Andrade-Hoyos et al., 2012).

Al llegar a la raíz, las zoosporas se enquistan y se fijan firmemente a la epidermis, estableciendo así el punto de entrada para la colonización del tejido. El patógeno afecta gravemente a la planta, desencadenando inicialmente un estrés hídrico a nivel de los tejidos que se manifiesta en síntomas progresivos: marchitez, secado de ramas y hojas, culminando en la muerte regresiva del árbol desde la copa hacia abajo. En las etapas previas, es posible observar síntomas foliares claros como clorosis (amarillamiento), reducción del tamaño de las hojas y detención del crecimiento, lo que conduce a una defoliación parcial y a una caída significativa en la producción de frutos (Osorio et al., 2017).

La capacidad de supervivencia del microorganismo fuera del huésped agrava el problema, ya que puede persistir en el suelo alimentándose de materia orgánica en descomposición por periodos que pueden extenderse hasta seis años. Debido a esto, la enfermedad tiene una distribución global, encontrándose presente en las principales zonas de cultivo de aguacate en el mundo. Cuando las condiciones ambientales son favorables para el patógeno, los brotes pueden ser devastadores para la agricultura comercial, provocando pérdidas económicas severas en los sistemas de producción (Ruiz et al., 2019; Gómez, 2018).



Figura 3. El árbol de aguacate. A) Árbol de aguacate con signos de la presencia de la enfermedad tristeza del aguacate. B) Árbol de aguacate en proceso de recuperación después de ser tratado con poda de saneamiento y microorganismos benéficos.

4.Ciclo de vida de *Phytophthora cinnamomi*

El desarrollo de *Phytophthora* se favorece en suelos con temperaturas moderadas (15–23°C) y con altos niveles de humedad, ya sea por lluvias abundantes o por exceso de riego. Bajo estas condiciones, el patógeno puede reproducirse y propagarse con facilidad, afectando principalmente el sistema radicular del aguacate (Fig. 2). Durante las épocas frías o secas, el microorganismo permanece en estado latente en raíces, tubérculos, restos vegetales o directamente en el suelo, utilizando distintas estructuras de resistencia que se mencionan a continuación:

Oosporas: esporas sexuales de pared gruesa que permanecen inactivas hasta que las condiciones son favorables.

- Micelio: red de hifas que constituye la parte vegetativa del patógeno.
- Esporangios: estructuras que germinan o liberan zoosporas móviles, responsables de nuevas infecciones.

- Clamidosporas: esporas de resistencia formadas para sobrevivir en suelos adversos.

El patógeno se dispersa principalmente por medios físicos, como las salpicaduras de lluvia que levantan partículas de suelo infectado, el arrastre de restos vegetales por el viento y el agua de escorrentía. En condiciones de alta humedad edáfica, las zoosporas se activan y desplazan en la película de agua del suelo, colonizando las raíces jóvenes. La infección ocurre al penetrar directamente las células epidérmicas o a través de heridas naturales o inducidas. Una vez dentro, el micelio invade el sistema vascular, bloqueando el flujo de agua y nutrientes hacia la parte aérea. En la copa del árbol, los esporangios germinan y liberan zoosporas que pueden generar infecciones secundarias en hojas y brotes, particularmente durante períodos prolongados de humedad foliar. La lluvia y el viento transportan estas esporas desde los tejidos infectados hacia el suelo o a otras plantas, perpetuando el ciclo de la enfermedad y desencadenando nuevos focos infecciosos como se muestra en la figura 2. La enfermedad se manifiesta con síntomas como la pudrición de raíces y la base del tallo,

marchitez progresiva, clorosis generalizada del follaje y, en infecciones avanzadas, la muerte regresiva de árboles adultos (Mohammednur, 2024).

5.Importancia de la microbiología del suelo

La biodiversidad microbiana del suelo, que abarca bacterias, hongos, protozoos, algas y nematodos, es fundamental para mantener y mejorar la calidad edáfica y su productividad biológica. Esta comunidad interactúa formando una compleja red trófica, cuyo equilibrio y estructura son indicadores directos de la funcionalidad y salud general del suelo. En el ámbito agrícola, estos microorganismos se erigen como una herramienta estratégica clave. Su aplicación contribuye a prevenir pérdidas en los cultivos causadas por fitopatógenos y a potenciar la producción global de alimentos. Al mismo tiempo, reducen la dependencia de plaguicidas y fertilizantes de síntesis química, lo que representa una alternativa productiva más sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Xin, 2024).

La salud del suelo es determinante para la productividad del aguacate. Un suelo microbiológicamente balanceado, con alta diversidad de bacterias y hongos benéficos, actúa como barrera natural contra enfermedades como la pudrición radical causada por *P. cinnamomi*. Estos microorganismos ejercen control a través de competencia por nutrientes y espacio, producción de compuestos antimicrobianos, micoparasitismo e inducción de defensas en la planta. Además, mejoran la absorción de nutrientes, promueven el desarrollo radicular y fortalecen la resistencia del árbol. El desequilibrio, causado por monocultivos o uso excesivo de agroquímicos, favorece la proliferación de patógenos. En contraste, prácticas como la aplicación de materia orgánica, coberturas vegetales, buen manejo del agua y el uso de bioinsumos restauran y mantienen la biodiversidad del suelo, ofreciendo una estrategia sustentable para reducir la dependencia de fungicidas y asegurar la productividad del cultivo (Pinto et al., 2024).

6. Control de la tristeza del aguacate

6.1 Manejo preventivo

Antes de establecer una plantación, es fundamental realizar análisis físicos, químicos y biológicos del suelo para identificar riesgos potenciales de infección. El material vegetal debe mantenerse libre de contaminación, evitando el contacto con el suelo y aplicando tratamientos de desinfección mediante vapor o productos autorizados. Asimismo, es indispensable asegurar que las plantas destinadas al trasplante estén completamente libres del patógeno. Las podas de saneamiento, es otra forma de controlar al patógeno, retirando constantemente ramas muertas, enfermas o con síntomas de alguna enfermedad o planta y quemando el material vegetal.

6.2 Uso de Portainjertos resistentes

Los árboles de aguacate requieren un portainjerto para poder producir una variedad comercial. La búsqueda portainjertos criollos con genotipos tolerantes ha permitido identificar variedades de la raza mexicana con mayor resistencia al patógeno. Estudios han señalado que los portainjertos Atlixco, Tepeyano y Colín V-33, presentan un comportamiento tolerante frente a *P. cinnamomi*, lo que los convierte en alternativas viables para zonas con alta incidencia (Andrade-Hoyos et al., 2015).

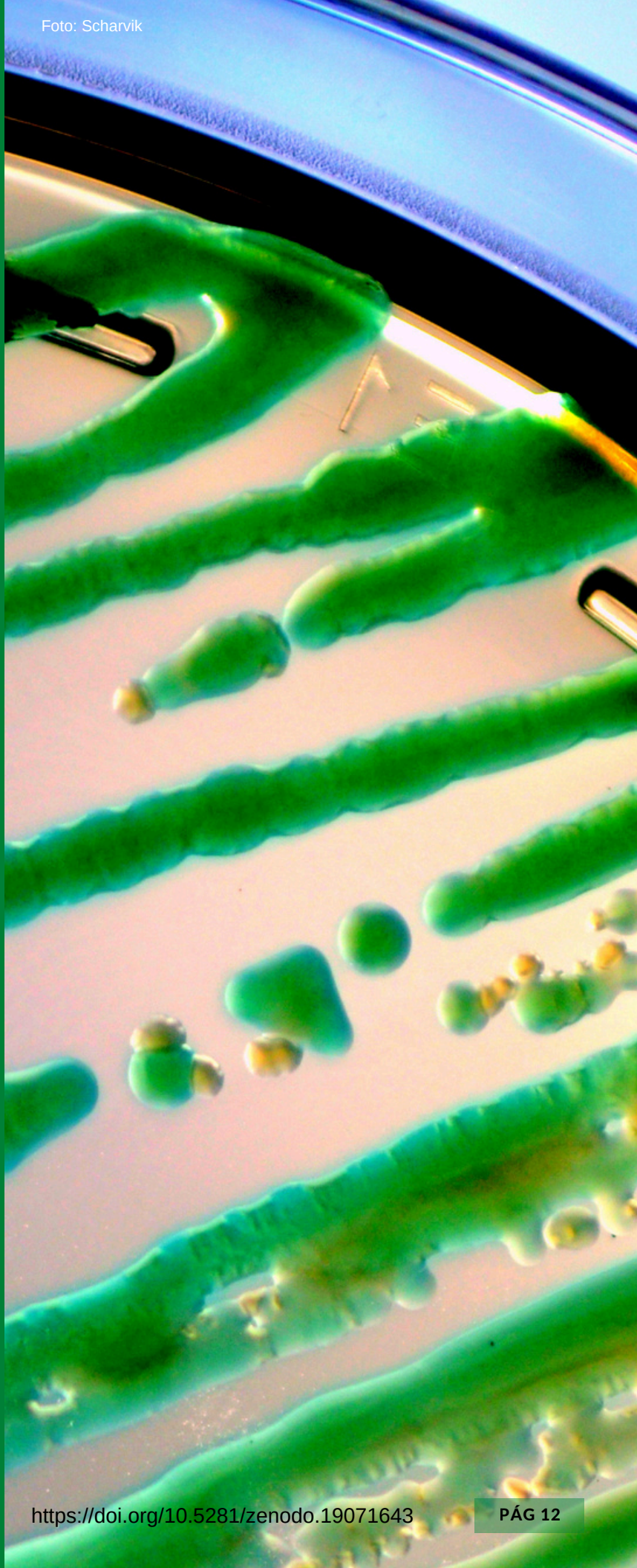
6.2 Control químico

El empleo de fungicidas constituye aún una herramienta clave en el manejo de esta enfermedad. Entre los moléculas o compuestos de uso común se encuentran el sulfato de cobre pentahidratado, mancozeb, metalaxil, cimoxanilo y fosetil aluminio. En este sentido, se ha documentado el uso rotatorio de compuestos como mefenoxam, fosfito de potasio, oxatiapiprolin, fluopicolide, mandipropamida y etaboxam con dicho propósito (Belisle et al., 2019). La endoterapia vegetal es una técnica de aplicación directa que consiste en inyectar

un compuesto sistémico en los haces vasculares del árbol, alcanzando así las estructuras botánicas colonizadas por el patógeno. El procedimiento implica realizar una perforación en el tronco mediante un taladro y utilizando un dispositivo de inyección a presión, se introduce el producto para que se distribuya de manera uniforme por todo el sistema vascular de la planta. Este método ha demostrado ser una estrategia eficaz para el control de *P. cinnamomi* en plantas de aguacate afectadas por la enfermedad (Agapito-Amador et al., 2022).

6.3 Control biológico

Existen microorganismos benéficos que además de ser antagonistas de *Phytophthora* son de gran utilidad en la agricultura, ya que contribuyen a reducir e incluso, eliminar el uso de agroquímicos, que han provocado la degradación y contaminación del suelo por su uso desmedido. Varios autores mencionan que entre los microorganismos más útiles en esta actividad encontramos a *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Trichoderma* (Sumida et al., 2022), quienes actúan como antagonistas naturales de *P. cinnamomi*. Las especies del género *Pseudomonas* figuran entre los agentes de control biológico más estudiados para el manejo de múltiples fitopatógenos, entre los que se incluye *Phytophthora* (Zohara et al., 2016). Por otro lado, entre los hongos más eficientes se encuentran hongos de los géneros *Trichoderma*, *Penicillium* y *Aspergillus*. El género *Trichoderma* es un grupo de omicetos de gran relevancia, destacado por su eficacia como agente de control biológico. Su potencial se fundamenta en diversos y versátiles modos de acción, entre los que se pueden mencionar: 1) la competencia por nutrientes y espacio con otros microorganismos rizosféricos, 2) la producción de antibióticos, 3) el micoparasitismo directo sobre patógenos y 4) la inducción de respuestas de defensa sistémicas en la planta. Además de su papel protector, se ha documentado que diversas especies de *Trichoderma* ejercen un efecto beneficioso directo sobre el crecimiento vegetal y promoviendo el desarrollo de las plantas (Fig. 3; Guzmán-Guzmán et al., 2023; Harman et al., 2004; de Andrade Lourenço et al., 2022; Sumida et al., 2022).



7. Conclusión

La "tristeza del aguacate", provocada por *P. cinnamomi*, sigue siendo una de las principales limitantes para la producción de este cultivo en Michoacán, México, y en otras zonas productoras a nivel mundial. Ante esta amenaza, surge como alternativa viable la integración de estrategias biotecnológicas y prácticas agrícolas sostenibles, superando la dependencia de los métodos químicos tradicionales.

El manejo eficaz de esta enfermedad requiere un enfoque integral, fundamentado en el conocimiento de su epidemiología y en la aplicación conjunta de diversas estrategias. Este manejo integrado incluye la aplicación de agentes de biocontrol (como bacterias y hongos benéficos), la selección de portainjertos resistentes, un manejo adecuado del suelo (con incorporación de materia orgánica y mejora del drenaje) y prácticas culturales apropiadas. La sinergia de estas acciones contribuye a restaurar el microbiota del suelo, fortalecer la salud radical, suprimir el patógeno y, en última instancia, promover una mayor productividad y longevidad del cultivo. De este modo, se transita hacia un sistema agrícola más sostenible y resiliente, que busca un equilibrio entre la rentabilidad económica, la conservación del ambiente y el bienestar de los productores.

8. Referencias

Agapito-Amador, M. E., Cibrián-Llanderal, V. D., Rojas, M. G., Ruiz-Juárez, D., Corona, B. E. L., & Rueda-Puente, E. O. (2022). *Phytophthora cinnamomi* Rands en aguacate. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, (28), 331-341. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3287>

Andrade-Hoyos, P., De León, C.; Espíndola, B. M. C.; Alvarado, R.D.; López, J, A.& García, E. R. (2012). Selección de porta-injertos de aguacate para tolerancia-resistencia a *Phytophthora cinnamomi* Rands, usando temperaturas controladas. Spanish Journal of Rural Development. 4:1-8.

Andrade-Hoyos, P., De León, C., Molina Gayosso, E., Espíndola Barquera, M. D. L. C., Alvarado Rosales, D., & López Jiménez, A. (2015). Totipotencialidad en plántulas de aguacate en la resistencia a *Phytophthora cinnamomi*. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 6(2), 361-373. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342015000200011&script=sci_arttext

Belisle, R. J., Hao, W., McKee, B., Arpaia, M. L., Manosalva, P., & Adaskaveg, J. E. (2019). New oomycota fungicides with activity against *Phytophthora cinnamomi* and their potential use for managing avocado root rot in California. Plant Disease, 103(8), 2024-2032. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-18-1698-RE>

de Andrade Lourenço, D., Branco, I., y Choupina, A. (2022). A systematic review about biological control of phytopathogenic *Phytophthora cinnamomi*. Molecular Biology Reports, 49 (10), 9947-9962. <https://doi.org/10.1007/s11033-022-07547-2>

Gómez, R. A. (2018). Efecto inhibitorio in vitro de aceites esenciales contra oomicetos de importancia económica que afectan el cultivo de aguacate. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Tesis licenciatura. Saltillo, Coahuila, México. 20-29 pp. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/45159>

Guzmán-Guzmán, P., Kumar, A., de Los Santos-Villalobos, S., Parra-Cota, F. I., Orozco-Mosqueda, M. D. C., Fadiji, A. E., & Santoyo, G. (2023). *Trichoderma* species: Our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases-A review. Plants, 12(3), 432. <https://doi.org/10.3390/plants12030432>

Hardham, A.R (2005). *Phytophthora cinnamomi*. Phytopathology Molecular, 6 (6), 589-604. <https://doi.org/10.1111/mpp.12568>

Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). *Trichoderma* species opportunistic, avirulent plant symbionts. Nature reviews microbiology, 2(1), 43-56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>

Mohammednur, T. (2024). Biology, ecology and integrated management of avocado root rot (*Phytophthora cinnamomi*) in Ethiopia: a review. Plant Protection. <https://doi.org/10.33804/pp.008.03.5273>

Osorio, A. L.; Burbano, F. O.; Arcila, C. A; Vázquez, B. A.; Carrascal, P. F. y Romero, F. J. (2017). Distribución espacial del riesgo potencial de marchitamiento del aguacate causado por *Phytophthora cinnamomi* en la subregión de Montes de María, Colombia. Rev. Colomb. Cienc. Hortic. 11(2):273-285.

<http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i2.7329>

Pinto, A. G., Kos, T., Puškarić, J., Vrandečić, K., Benković-Lačić, T., & Brmež, M. (2024). Soil ecosystem functioning through interactions of nematodes and fungi *Trichoderma* sp. Sustainability, 16(7), 2885.
<https://doi.org/10.3390/su16072885>

Ruiz, G. F.; Navarro, C. R. y Pérez L. A. (2019). Estudio de la interacción entre oomicetos de podredumbre radical y *Quercus ilex* L. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 45(2):149-160.
<https://doi.org/10.31167/csecfv5i45.19871>

Sumida, C. H., Fantin, L. H., Braga, K., Canteri, M. G., & Homechin, M. (2020). Control of root rot (*Phytophthora cinnamomi*) in avocado (*Persea Americana*) with bioagents. Summa Phytopathologica, 46(3), 205-211.
<https://doi.org/10.1590/0100-5405/192195>

Xin, J. (2024). Enhancing soil Health to minimize Cadmium accumulation in agroproducts: The role of microorganisms, organic amendments, and nutrients. Environmental Pollution, 348, 123890.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123890>

Zohara F, Akanda MAM, Paul NC et al. (2016) Efectos inhibidores de *Pseudomonas* spp. sobre el patógeno vegetal *Phytophthora capsici* in vitro e in planta. Biocatal Agric Biotechnol 5:69–77.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2015.12.009>

Sobre los autores



M.C. Gamaliel Valdivia Rojas. Docente e investigador del ITS Los Reyes, imparte cátedra en Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable y en la Maestría en Agrobiotecnología. Como responsable del Laboratorio de Biotecnología, dirige tesis y proyectos sobre propagación de plantas y microorganismos benéficos.



Sergio Heredia Mora. Ingeniero en Innovación Agrícola Sustentable, con especialidad en nutrición, asesor técnico en el cultivo de aguacate en la zona de Tancítaro Michoacán.

Cita:

Heredia Mora, S., & Valdivia Rojas, G. (2026). El enemigo silencioso del aguacate: *Phytophthora cinnamomi*. Biotecnológica Magazine, 4(1), 7–14.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.19071643>

Efectos del cambio climático en la seguridad alimentaria: algunas soluciones basadas en biotecnología



Norma Y. Hernández Saavedra

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

nhernan04@cibnor.mx

Foto: Piyaset

Tema

El cambio climático está agravando las amenazas a la seguridad alimentaria mundial al afectar la productividad agrícola, la distribución de alimentos y la calidad de los nutrientes. La biotecnología se reconoce cada vez más como una herramienta clave para adaptar los sistemas alimentarios a estos desafíos, ofreciendo soluciones innovadoras para mejorar la resiliencia, la productividad y el valor nutricional de los cultivos.

1.Introducción

El Cambio Climático (CC, por sus siglas en español) representa una amenaza significativa para la seguridad alimentaria mundial al alterar la temperatura, la humedad y los patrones de lluvia, además de incrementar la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos, lo cual afecta negativamente la agricultura, las cosechas y la calidad nutricional de los cultivos (Fig. 1A). Lo anterior, aumenta la

volatilidad de los precios de los alimentos y agrava la desnutrición, especialmente en regiones vulnerables y entre las poblaciones marginadas (Schmidhuber y Tubiello, 2007). El CC también promueve cambios en el comportamiento de los microorganismos y las plagas, lo que puede provocar la aparición y el agravamiento de enfermedades transmitidas por los alimentos (Fig. 1B). Las condiciones ambientales cambiantes favorecen la propagación de especies invasoras y la proliferación de algas productoras de toxinas, lo que da lugar a brotes de contaminación de productos del mar (EFESA, 2025), por lo que los factores socioeconómicos y las disparidades regionales influyen aún más en la gravedad de estos impactos (Mirzabaev et al., 2023).



Figura 1. Efectos del Cambio Climático. Panel A, Contaminación ambiental y el incremento de la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos afectan negativamente la agricultura, las cosechas y la calidad nutricional de los cultivos; Panel B, el CC genera nuevas condiciones ambientales que son una oportunidad para la proliferación de enfermedades en cultivos y frutos (Canva).



La biotecnología ofrece estrategias eficaces para contrarrestar algunos efectos del estrés climático. Técnicas como la ingeniería genética, la edición genómica y la selección asistida por marcadores se utilizan para desarrollar cultivos con mayor resistencia a la sequía, el calor y las plagas, así como perfiles nutricionales mejorados. Las innovaciones biotecnológicas también apoyan prácticas sostenibles, como el biocarbón para la fertilidad del suelo y el biogás para la generación de energía renovable, entre otras.



Figura 2. Nueve clases en las que la FAO clasificó las 44 innovaciones que considera que influirán en la alimentación del planeta para el 2050 (Canva).

2. Los Sistemas Alimentarios y el Cambio Climático

Los sistemas alimentarios del planeta están bajo presión debido a los cambios de temperatura (la temperatura elevada), los cambios en los patrones de lluvias, el aumento de la población y las diversas exigencias alimenticias. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) ha identificado 44 innovaciones emergentes —que incluyen insectos comestibles, alimentos impresos en 3D

y agricultura en ambientes controlados— que pueden transformar la producción de alimentos y la seguridad de la agricultura en el futuro próximo (Di Martino et al., 2025). Sin embargo, para que esto sea posible, es muy importante que exista una legislación proactiva y se de la colaboración entre sectores, a fin de garantizar que estos adelantos apoyen los propósitos de salud pública y del medio ambiente.

En respuesta a esta problemática, se están desarrollando nuevas formas de alimentarse y producir en todo el planeta. En los próximos 25 años, estas innovaciones tendrán la capacidad

de cambiar la forma en la que se producen los alimentos y como los consumimos. Dentro de su labor de exploración, la FAO realizó una actividad de prospección para indagar las posibles consecuencias de estos adelantos sobre la inocuidad alimentaria. A través de entrevistas con especialistas y la aplicación de métodos estadísticos, la investigación determinó que existen cuarenta y cuatro innovaciones catalogadas en nueve clases (Fig. 2) que se cree que influenciarán los procesos alimenticios del planeta en los próximos 25 años.

Para alcanzar los objetivos futuros de seguridad alimentaria, a medida que la población mundial se acerca a los 10 000 millones de personas, la transformación de los sistemas agroalimentarios es crucial para que sean más resilientes, inclusivos y ambientalmente sostenibles en sincronía con la necesidad de legislación proactiva y colaboración intersectorial para garantizar que estos avances favorezcan la salud pública y la sostenibilidad ambiental (Fig. 3).

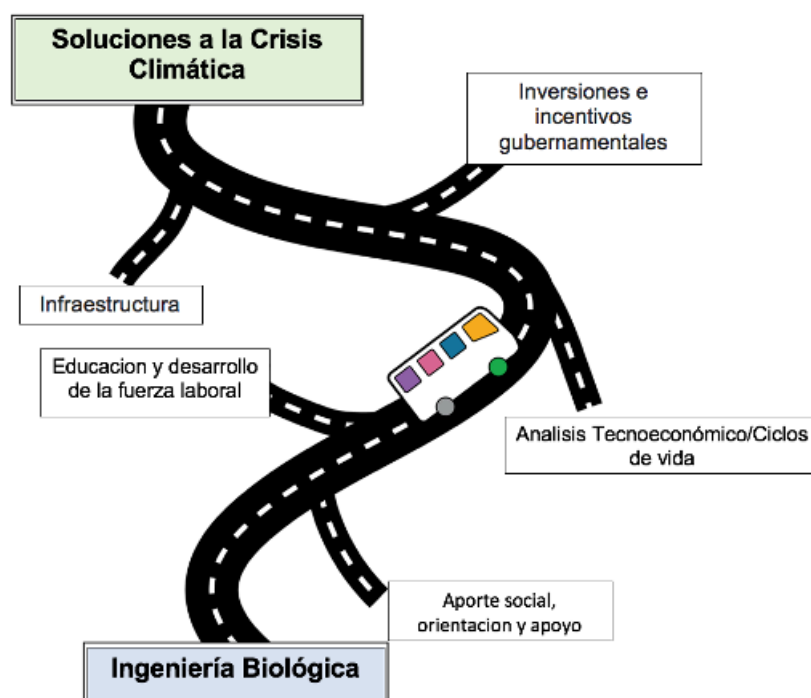


Figura 3. Factores que fortalecen el camino hacia soluciones de ingeniería biológica a la crisis climática (modificado de Aurand et al., 2024).



Foto: Moiescu

3. Estrategias y soluciones para abordar los desafíos de seguridad alimentaria inducidos por el cambio climático.

A continuación, se presentan algunas estrategias y soluciones para abordar los desafíos de seguridad alimentaria inducidos por el CC, abarcando medidas de adaptación para la resiliencia agrícola, esfuerzos de mitigación para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas en español) de la agricultura, intervenciones políticas y marcos institucionales, y cooperación y alianzas internacionales (Cheng et al., 2021; Toromade et al., 2024).

3.1 Las prácticas de gestión sostenible de la tierra

Estas prácticas desempeñan un papel crucial en la mejora de la capacidad de los sistemas agrícolas para afrontar el CC, a la vez que promueven la salud del suelo, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (De Corato, 2020). La agricultura de conservación y la agricultura orgánica son ejemplos de prácticas sostenibles de gestión de la tierra que pueden mejorar la estructura del suelo, la retención de agua y el ciclo de nutrientes, reducir la erosión, aumentar la fertilidad y mitigar los impactos del cambio climático en la productividad de los cultivos.

Otro ejemplo es la diversificación de cultivos, que implica la plantación de una variedad de cultivos con diferentes características y requisitos de crecimiento para mitigar los riesgos y mejorar la resiliencia al cambio climático (Zsögön et al., 2022; Fig. 4). Al diversificar sus cultivos, los agricultores pueden mitigar los impactos de los fenómenos meteorológicos extremos, las plagas y las enfermedades, garantizando un suministro de alimentos más estable y seguro. Además, la rotación de cultivos ayuda a mantener el contenido de nutrientes disponibles en el suelo y su estructura. La implementación de estrategias de rotación de cultivos debe tener en cuenta las características locales del suelo y las condiciones climáticas. La propia estrategia debe considerar factores como la selección de cultivos, la frecuencia de siembra y la secuencia de rotación. Esto es crucial porque la secuencia de rotación debe alternar entre cultivos hospedantes y no hospedantes (es decir, cultivos susceptibles a plagas y enfermedades). Otro detalle para considerar es el intervalo de siembra dentro del mismo ciclo de rotación de cultivos (Cherlinka, 2025).

3.2 La conservación del agua y las técnicas de riego eficientes

Son prácticas esenciales para optimizar la eficiencia del uso del agua y reducir la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas a la escasez de agua y la sequía (Vincent et al., 2020). Las tecnologías de riego por goteo, riego por aspersión y riego de precisión pueden suministrar agua directamente a la zona radicular de los cultivos, minimizando la evaporación y la escorrentía y maximizando la absorción de agua (Fig. 5A). Además, la captación de agua de lluvia, la conservación de la humedad del suelo y la reutilización de aguas residuales pueden aumentar el suministro de agua y amortiguar las fluctuaciones climáticas en las precipitaciones, garantizando así una fuente de agua fiable y sostenible para la agricultura (Khan et al., 2021).



Figura 4. Ejemplos de rotación de cultivos agrícolas: Trigo – Girasol – Barbecho; Maíz – Avena – Alfalfa o Trébol – Barbecho o Pasto; Zanahoria – Trigo – Pasto de trigo; rotación de trigo de invierno: Trigo – Trigo – Colza – Trigo – Trigo – Soja/Girasol, sembrados consecutivamente durante dos años; rotación de maíz de verano: Maíz (mazorca) – Soja – Girasol – Algodón – Maíz – Soja – Trigo (tomado de EOS, 2025).

3.3 El secuestro de carbono en el suelo y la vegetación

Este proceso puede ayudar a compensar las emisiones de GEI de la agricultura y a mitigar el cambio climático, a la vez que mejora la fertilidad y la productividad del suelo. Prácticas como los cultivos de cobertura, la retención de residuos de cultivos y la agroforestería (sistema que combina deliberadamente árboles y arbustos con cultivos y/o ganadería en la misma área, espacial o temporalmente) pueden aumentar el contenido de carbono orgánico de los suelos y la biomasa, secuestrando dióxido de carbono de la atmósfera y almacenándolo en los ecosistemas terrestres (Fig. 5B). Asimismo, la restauración de tierras degradadas, la conservación de hábitats naturales y las iniciativas de reforestación pueden mejorar aún más el potencial de secuestro de carbono y promover la conservación de la biodiversidad (Toromade et al., 2024).

3.4 Reducir la dependencia de los combustibles fósiles

Adoptar fuentes de energía renovables como la solar, la eólica y la bioenergía mitigarán las emisiones de GEI de las operaciones agrícolas y reducirán la huella de carbono de

la producción de alimentos. Las tecnologías de energía renovable, como los sistemas de riego con energía solar, los digestores de biogás y las turbinas eólicas, pueden proporcionar energía limpia y sostenible para las operaciones agrícolas, las instalaciones de procesamiento y las redes de transporte. Además, la adopción de tecnologías de bajas emisiones, como mejores prácticas de gestión del ganado, sistemas de captura de metano y digestión anaeróbica, pueden reducir las emisiones de metano provenientes de la fermentación entérica y el estiércol (Toromade et al., 2024; Fig. 5C).

4. Soluciones e innovaciones biotecnológicas

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) informó en 2019 que aproximadamente el 23% de las emisiones globales de GEI se atribuyen a la agricultura, la silvicultura y la degradación del suelo. Esto incluye las emisiones asociadas a la deforestación, el uso de fertilizantes, la gestión de residuos y otras prácticas relevantes.

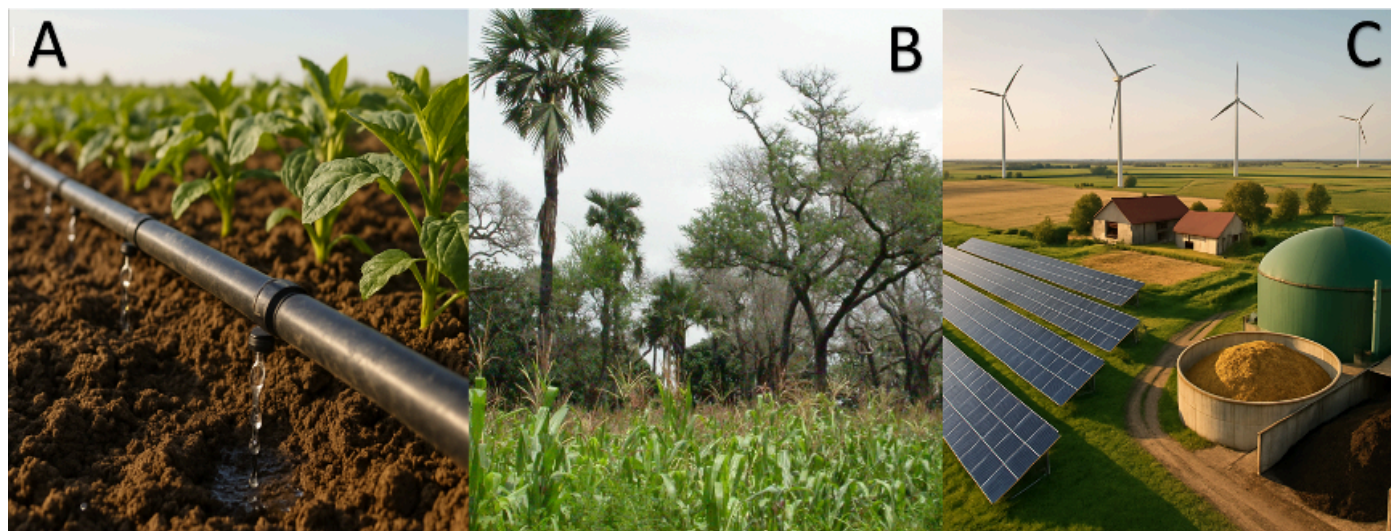


Figura 5. Ejemplos de prácticas de gestión sostenible de la tierra. Paneles: A, Riego por goteo; B, Agroforestería; C, Fuentes de energía renovables como la solar, la eólica. (Canva).



Figura 6. Biocarbón (tomado de Sela, 2025).

Las técnicas biotecnológicas que se emplean actualmente, como la aplicación de biocarbón, la producción de biogás y la biorremediación, han demostrado potencial para abordar diversos desafíos. Además, se propone la implementación de métodos avanzados o infrautilizados, como CRISPR/Cas9 para la edición genética de precisión, la agricultura de precisión y los sistemas a gran escala. Si bien algunas de estas prácticas ya se utilizan, se necesita más investigación para evaluar su productividad (cuánto valor y residuos se pueden obtener de ellas) y cómo mejorar su sostenibilidad para minimizar los residuos (Toromade et al., 2024).

4.1 Biocarbón

El biocarbón es una forma estable y porosa de carbono producida mediante pirólisis, un proceso que calienta residuos orgánicos, como residuos vegetales y animales, en ausencia de oxígeno a temperaturas de entre 350 y 700 °C; el producto resultante es un material muy poroso y rico en carbono, capaz de persistir en el suelo durante cientos o miles de años. Este proceso transforma biomasa como astillas de madera, estiércol y residuos de cultivos en carbón vegetal, biocombustible y gas de síntesis, lo que resulta en un material resistente a la descomposición (Fig. 6).

El creciente interés mundial en el biocarbón se debe a su capacidad para mejorar la salud del suelo al promover la actividad microbiana, absorber contaminantes, mitigar el cambio climático y elevar el pH del suelo, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la gestión de residuos y el uso sostenible de los recursos, especialmente en países con residuos orgánicos infrautilizados (Obonukut et al., 2022).

4.2 Biorremediación

Los GEI reducen la posibilidad de escape de calor al espacio lo que conduce a mantener altas temperaturas en la atmósfera inferior. Los desechos del transporte, la manufactura, la agricultura, la electricidad y la construcción causan contaminación ambiental al generar diversos gases cuya acumulación en la atmósfera es la principal fuente de GEI, además de ser los principales impulsores del cambio climático (Hernández Saavedra, 2024). La biorremediación es una estrategia de tratamiento flexible, rentable y ambientalmente sostenible que emplea organismos vivos, principalmente microorganismos, para degradar los contaminantes ambientales en formas menos tóxicas (Itam, 2020). La biodegradación, llevada a cabo con la ayuda de algas (y

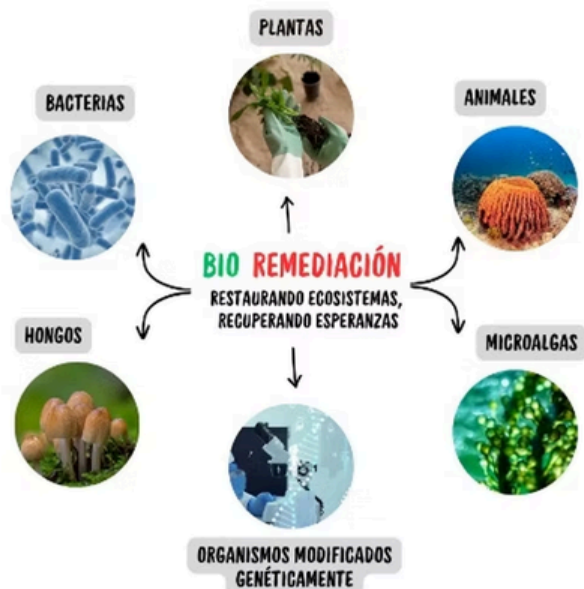


Figura 7. Tipos de grupos biológicos que participan en la biodegradación (tomado de Frances Mesa, 2024).

microalgas), hongos, bacterias, plantas, animales (Fig. 7) y otros grupos más específicos, como los actinomicetos (bacterias altamente abundantes en el suelo terrestre, donde descomponen la materia orgánica), es un proceso natural que no produce metabolitos intermedios dañinos y es una técnica eficaz para eliminar sustancias tóxicas. Esta alternativa demuestra ser más efectiva, rentable, menos peligrosa para los organismos y más ecológica (Gangola et al., 2023).

4.3 Innovaciones en la fermentación

La energía alternativa, el gas y la precisión en la fermentación son algunas de las nuevas técnicas de fermentación que se auguran para un mayor desarrollo en los próximos años. Para ilustrar, la transformación de biomasa toma uso de microorganismos para generar alimentos con alto contenido de proteínas. Por su parte, el biogás es una alternativa ecológica a los combustibles fósiles debido a su baja generación de emisiones peligrosas y sus mínimos efectos negativos. En contraste, los combustibles fósiles contribuyen significativamente a las emisiones GEI, una causa clave del cambio climático, el calentamiento global y el derretimiento de los hielos polares. Según el Centro Asiático y

del Pacífico para la Ingeniería y Maquinaria Agrícola, el biogás convierte los residuos agrícolas en combustible y fertilizante mediante digestión anaeróbica. Además, el digestato anaeróbico, una suspensión de residuos de la producción de biogás, es una rica fuente de nutrientes para las plantas y un buen sustituto de los fertilizantes minerales (Van Midden, et al., 2023).

Teniendo en cuenta que las prácticas agrícolas actuales contribuyen significativamente a las emisiones de GEI, un 17 % directamente a través de actividades agrícolas, y de un 7 % al 14 % adicional mediante cambios en el uso del suelo, se requieren cambios radicales para preparar el sistema alimentario para los desafíos futuros. La transformación adicional

de hábitats naturales en áreas agrícolas no es una opción. En el marco de los límites de un planeta saludable, los niveles de GEI actuales indican que el mundo ha superado los límites para el cambio en los sistemas de tierras y se necesita la reforestación. Para superar estos desafíos, la biotecnología alimentaria y la fermentación proporcionan alimentos e ingredientes alternativos. Una nueva hipótesis sugiere que la fermentación externa por microorganismos fue el impulsor de la expansión del cerebro humano al aumentar la biodisponibilidad de macro y micronutrientes (Bryant et al., 2023). En la actualidad, el sector de procesamiento de alimentos utiliza microorganismos para la conservación de alimentos y para producir una amplia gama de pro-

ductos de valor añadido; enzimas, compuestos de sabor, vitaminas, ácidos grasos Omega-3, postbióticos, cultivos microbianos probióticos o ingredientes alimentarios. La ventaja de las soluciones biotecnológicas es que los subproductos secundarios del sector agroalimentario, actualmente tratados como residuos, podrían convertirse en alimentos e ingredientes alimentarios (Dietrich, 2024). Por ejemplo, en Europa, el proyecto europeo VOLATILE demostró que los residuos biodegradables municipales pueden transformarse (mediante ácidos carboxílicos de cadena corta) en ácidos grasos Omega-3 beneficiosos para la salud utilizando microalgas heterótrofas. Y en el proyecto INNOPROTEIN, están utilizando enfoques innovadores de fermentación para producir nuevas fuentes de proteínas a partir de microalgas, hongos filamentosos y bacterias. Los subproductos del sector agroalimentario también pueden valorizarse en ácido gamma-aminobutírico (GABA), un neurotransmisor inhibitorio con varios beneficios para la salud en los seres humanos (Dietrich, 2024).

4.4 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un enfoque de gestión que aprovecha la recopilación, organización y análisis de datos para tomar decisiones informadas basadas en la variabilidad del campo. Al integrar diversas fuentes de datos, como los nutrientes del suelo, la presencia de plagas, la sanidad vegetal y las condiciones climáticas, permite a los agricultores adaptar sus prácticas a las necesidades específicas de cada parcela, optimizando así el uso de recursos y mejorando el rendimiento (Shafi et al., 2019). Este método, basado en datos, busca impulsar la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la agricultura, a la vez que reduce el desperdicio. Su crecimiento se ve impulsado por innovaciones tecnológicas como la agricultura vertical, la agricultura en ambientes controlados, la robótica, la automatización y la inteligencia artificial (Robovision, 2025).

4.5 Nuevos alimentos

De acuerdo con la Unión Europea, cualquier alimento que no se estuviera consumiendo de manera significativa antes de mayo de 1997, con independencia de las fechas de adhesión de los Estados miembros a la Unión, se considera un ‘nuevo alimento’ o novel food. Este término comprende “nuevos alimentos, alimentos procedentes de nuevas fuentes, nuevas sustancias utilizadas en los alimentos y nuevas formas y tecnologías para elaborar alimentos” (Palomo y Prieto Hontoria, 2024).

Las fuentes de alimentos emergentes analizadas están, en gran medida, infrautilizadas a nivel mundial debido a limitaciones regionales o a recientes avances tecnológicos. Como ejemplo, se pueden mencionar los insectos comestibles, que están ganando reconocimiento como fuentes de proteína sostenibles y de alta calidad con un impacto ambiental mínimo como el *Tenebrio molitor* (para alimentación humana o animal; Fig. 8A), el cual actualmente está aprobado por la UE, lo que ofrece opciones prometedoras para diversificar y mejorar la seguridad alimentaria mundial. Los hongos (que engloban mohos y levaduras; Fig 8B) tienen un gran potencial debido a su alto contenido en proteínas (30-50%), presentan un amplio perfil aminoacídico (que cumple las directrices de la FAO), proporcionan vitaminas del grupo complejo B y son ricos en glucanos (en sus paredes celulares), que aportan fibra a la dieta. Como otras fuentes de alimentos emergentes, se incluyen grasas y aceites alternativos como el tucumã, un fruto de palma amazónica con beneficios para la salud, así como cultivos infrautilizados como la jojoba (Fig. 8C), el teff y el mijo, que son resilientes al cambio climático y altamente nutritivos (Cortes, 2022).



Figura 8. Ejemplos de alimentos alternativos. A, jojoba; B, Tenebrios o mealworms; y C, hongos comestibles (Canva).

5. Biotecnología: innovando en la elaboración de alimentos

Para mejorar la seguridad alimentaria y los medios de vida, es crucial desarrollar estrategias que reduzcan el riesgo de sequía, sostengan la producción agrícola y animen a los pequeños agricultores a adoptar prácticas de gestión eficaces. La biotecnología desempeña un papel clave en este esfuerzo, especialmente en las regiones desérticas, al mejorar la resiliencia y la nutrición de los cultivos mediante técnicas como la ingeniería genética (Fig. 9A), el cultivo de tejidos vegetales (Fig. 9B) y la selección asistida por marcadores. Innovaciones como el maíz TELA, un cultivo genéticamente modificado resistente a la sequía y las plagas, y las variedades biofortificadas, están transformando la producción alimentaria al ofrecer soluciones escalables y sostenibles a desafíos como la sequía, las plagas y la desnutrición. Dentro de las estrategias biotecnológicas actualmente en uso en el mejoramiento de cultivos hacia la sustentabilidad alimentaria incluyen las siguientes: (i) Ingeniería

genética, (ii) Cultivo de Tejidos para propagación masiva, (iii) Selección asistida por marcadores moleculares, entre otras.

5.1 Las técnicas de ingeniería genética (GET, por sus siglas en inglés)

Estas técnicas implican el uso de métodos artificiales para modificar el material genético o el genoma de una célula u organismo con el fin de alterar sus rasgos hereditarios. Esto implica la transferencia de genes o rasgos específicos de una célula viva a otra, incluso entre especies distintas. Las nucleasas de sitio específico (SSN, por sus siglas en inglés) con secuencias de ARN o dominios de unión al ADN se han empleado en las GET convencionales para dirigirse al genoma y editarlo. Las nucleasas de dedo de zinc (ZFN, por sus siglas en inglés), las nucleasas efectoras de tipo activador de la transcripción (TALEN, por sus siglas en inglés) y las meganucleasas son formas de SSN; sin embargo, están obsoletas debido a su dependencia de una cantidad limitada de loci, la necesidad de construir enzimas específicas, el alto

coste de crear dominios proteicos específicos y la necesidad de construir vectores con monómeros específicos y los efectos fuera del objetivo asociados. Con los progresos logrados en biología molecular, han surgido técnicas avanzadas de ingeniería genética (como repeticiones palindrómicas agrupadas y regularmente interespaciadas [CRISPR/Cas9, CRISPR/Cpf1], edición primaria, edición de bases y herramientas de modificación epigenética). Estas técnicas permiten la edición precisa y eficiente de genomas en períodos de tiempo más cortos.

5.2 Cultivo de Tejidos.

Las plantas se ven frecuentemente expuestas a diversos factores de estrés bióticos y abióticos que pueden perjudicar su desarrollo y crecimiento, reduciendo el rendimiento de cultivos de importancia económica y causando pérdidas económicas sustanciales a nivel mundial. Para mitigar estos efectos, el mejoramiento de variedades de plantas tolerantes al estrés ha sido una práctica generalizada durante décadas, y el cultivo de tejidos vegetales se ha

consolidado como un método rentable y eficiente para este propósito. El cultivo de tejidos vegetales es un método para cultivar rápidamente numerosas plantas con características genéticas mejoradas en un entorno regulado. Implica técnicas para el crecimiento o mantenimiento de células, tejidos u órganos vegetales en condiciones estériles en un medio de cultivo de nutrientes de composición conocida. El cultivo de tejidos vegetales ha generado enormes avances en los últimos años y ahora es una herramienta vital para el desarrollo de las ciencias agrícolas y la agricultura moderna. Mediante el cultivo de tejidos, los investigadores pueden desarrollar y cribar genotipos tolerantes al estrés e investigar alteraciones en el metabolismo y la fisiología bajo estrés. La selección in vitro en entornos controlados ofrece un enfoque altamente efectivo y rentable para el desarrollo de la tolerancia al estrés vegetal.

5.3 Impresión 3D de alimentos

Mediante el uso de "tintas alimentarias", esta tecnología puede replicar texturas complejas que imitan fielmente productos alimenticios complejos, como la carne. Varias alternativas vegetales a la carne y el marisco ya están a punto de comercializarse (Di Martini et al., 2025; Hernández Saavedra, 2023; Fig. 9C).



Figura 9. Tres representaciones de las principales áreas de la innovación de alimentos mediante técnicas biotecnológicas. A, Ingeniería genética; B, cultivo de tejidos; y C, Impresión 3D de alimentos (Canva).

5.4 Selección asistida por marcadores.

La selección asistida por marcadores moleculares, o SAM, es una herramienta utilizada por genetistas y fitomejoradores como un enfoque práctico para el mejoramiento, con el fin de aumentar la eficiencia de la selección y acelerar el ciclo de mejoramiento. En comparación con la selección fenotípica convencional, la SAM es más eficiente, confiable y efectiva. Los marcadores moleculares pueden identificar rápidamente rasgos económicamente significativos en la población de mejoramiento, lo que permite su posterior manipulación en un período más corto. Al aplicar marcadores en la etapa de plántula, se puede lograr una alta precisión a un costo reducido, lo que mejora las respuestas de selección positivas. En la SAM, el polimorfismo a nivel de ADN acelera el proceso de selección, siendo los marcadores codominantes, como los marcadores microsatélites/SSR, los marcadores RFLP y los SNP, los más utilizados.

6. Conclusión

El CC amenaza la seguridad alimentaria debido a cambios de temperatura, patrones de lluvia alterados, y plagas, afectando la producción agrícola y la calidad de los productos. Esto, junto con el crecimiento demográfico, aumenta la demanda de alimentos, haciendo crucial la seguridad alimentaria. La biotecnología ofrece soluciones para crear cultivos resistentes al estrés, superando las limitaciones de los métodos tradicionales. Técnicas como la ingeniería genética y la edición genómica permiten modificaciones precisas y rápidas en plantas, ayudando a desarrollar cultivares que satisfagan la demanda alimentaria y promuevan la agricultura sostenible frente al cambio climático.

7. Referencias

- Aliaga Sandoval, J. 2025. Impresión 3D: innovación aplicada a los alimentos. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile. Consultado 02/12/2025.
- Cortes, A. (2022). Las nuevas fuentes de proteínas que revolucionan la alimentación del futuro. ASEBIO. Consultado 02/12/2025.
- Jiménez, J.A., Sanz, C. (2024). Biotecnología: la clave para abordar la triple crisis ambiental y alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible. ASEBIO. Consultado 01/12/2025.
- Aurand, E.R., Moon, T.S., Buan, N.R. et al. (2024). Addressing the climate crisis through engineering biology. *npj Clim. Action* 3, 9. <https://doi.org/10.1038/s44168-023-00089-8>
- Bryant, K.L., Hansen, C. Hecht, E.E. (2023). Fermentation technology as a driver of human brain expansion. *Commun Biol* 6, 1190. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05517-3>.
- Cheng, Y., Liu, H., Wang, S., Cui, X., Li, Q. (2021). Global action on SDGs: Policy review and outlook in a post-pandemic era. *Sustainability*, 13(11), 6461. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6461>
- Cherlinka, V. (2025). Rotación De Cultivos: Tipos Y Ejemplos Prácticos. EOS Data Analytics. Consultado 01/12/2025.
- CLU-IN. (2023). Bioremediation. CLU-IN. Consultado 22/10/2025
- De Corato, U. (2020). Towards new soil management strategies for improving soil quality and ecosystem services in sustainable agriculture: Editorial overview. *Sustainability*, 12(22), 9398. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/22/9398>
- Di Martino, M., Feeney, J., Fattori, V. (2025). From Insects to Indoor Farms: Food Innovations That Could Transform What We Eat By 2050. Farming First. Consultado 22/10/2025
- Dietrich, T. (2024). La biotecnología alimentaria y la fermentación al servicio de los ingredientes y la salud. tecnal:a. Consultado 02/12/2025.

EFESA. (2025). Cambio climático y seguridad alimentaria. Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, EFESA por sus siglas en ingles. Consultado 03/11/2025.

Frances Mesa, J.L. (2024). Biorremediación para la degradación de contaminantes ambientales. Juventud Técnica. Consultado 01/12/2025.

Gangola, S., Joshi, S., Bhandari, G., Bhatt, P., Kumar, S., Pandey, S. C. (2023). Omics approaches pesticide biodegradation for a sustainable environment. En: *Advanced Microbial Techniques in Agriculture, Environment, and Health Management* (pp. 191–203). Elsevier.

Hernández Saavedra, N.Y. (2024). Contaminación por plásticos: estrategias biotecnológicas para su manejo. 2(4):7-21 <https://doi.org/10.5281/zenodo.13685488>.

Hernández Saavedra, N.Y. (2023). ¿Tienes un antojo? ¡Albóndigas de carne de mamut!. *Biotechnológica Magazine*, 1(2):13–17. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8184720>.

Itam, DH. (2020). The use of biochar for bioremediation of crude oil/hydrocarbon polluted soils: Bioremediation of polluted soils, studies, results and possibilities. *Hydrom Poll Soils*, 8:1. doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3707749>.

Khan, N., Ray, R.L., Sargani, G.R., Ihtisham, M., Khayyam, M., Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: Gateway to sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(9), 4883. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/9/4883>.

Mirzabaev, A., Kerr, R., Hasegawa, T., Pradhan, P., Wreford, A., Von Der Pahlen, M., Gurney-Smith, H. (2023). Severe climate change risks to food security and nutrition. *Climate Risk Management*, 39:100473. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100473>.

Obonukut, M., Alabi, S., Jock, A. (2023). Biochar from Cassava Waste: A Paradigm Shift from Waste to Wealth. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/83491>.

Occident. (2023). 8 ejemplos de alimentos transgénicos que consumes sin saber que lo son. <https://www.occident.com/blog/alimentos-transgenicos-ejemplos/>

Palomo, V., Prieto Hontoria, P.L. (2024). Nuevos alimentos: no son milagrosos, pero pueden traer mejoras nutricionales. Nutriendo ALDI. Consultado 01/12/2025.

Robovision. (2025). Top 5 AgTech trends in 2025. ROBOVISION. Consultado 27/11/2025.

Schmidhuber, J., Tubiello, F. (2007). Global food security under climate change. *PNAS*, 104:19703–19708. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701976104>.

Shafi, U., Uferah, M.R., García-Nieto, J., Hassan, S.A., Zaidi, S.A.R., Iqbal, N. (2019). Precision agriculture techniques and practices: From considerations to applications. *Sensors*. 2019;19(17): 3796. doi: <https://doi.org/10.3390/s19173796>.

Toromade, A., Soyombo, D., Kupa, E. Ijomah, T. (2024). Reviewing the impact of climate change on global food security: Challenges and solutions. *Inter J Appl Res Soc Sci*, 6(7):1403-1416. <https://fepbl.com/index.php/ijarss/article/view/1300>.

Van Midden, C., Harris, J., Shaw, L., Sizmur, T., Pawlett, M. (2023). The impact of anaerobic digestate on soil life: A review. *Appl. Soil Ecol.*, 191: 105066. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105066>.

Vincent, A.A., Segun, I.B., Loretta, N.N., Abiola, A. (2021). Entrepreneurship, agricultural value-chain and exports in Nigeria. *United International Journal for Research and Technology*, 2(08), 1-8. <https://uijrt.com/articles/v2/i8/UIJRTV2I80001.pdf>.

Zsögön, A., Peres, L.E., Xiao, Y., Yan, J., Fernie, A.R. (2022). Enhancing crop diversity for food security in the face of climate uncertainty. *The Plant Journal*, 109(2), 402-414.

Sobre la autora



Dra. Norma Y. Hernández Saavedra.
Investigadora Titular, CIBNOR. Sistema
Nacional de Investigadores Nivel 2. Scopus,
Research Gate, ORCID, Academia.

Cita:

Hernández Saavedra, N. Y. (2026). Efectos del
cambio climático en la seguridad alimentaria:
algunas soluciones basadas en biotecnología.
Biotecnológica Magazine, 4(1), 15-28.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.19072126>



Vinagre: Una fuente natural, biodegradable y económica de celulosa bacteriana

*Dra. Abigail María Díaz Guerrero y Dra. Ana Beatriz Morales Cepeda**

Centro de Investigación en Petroquímica Secundaria, Campus 3, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero/Tecnológico Nacional de México, Parque Industrial Tecnía, Bahía de Aldahir S/N, C.P. 89603 Altamira, Tamaulipas, México.

**Autor de correspondencia: ana.mc@cdmadero.tecnm.mx*

Foto: Cobanoglu

Tema

Las madres del vinagre son películas de nata que se forman en la superficie del vinagre cuando se le deja fermentar por suficiente tiempo, como uno de los productos de la reacción de fermentación acética que ocurre gracias a las bacterias del género *Acetobacter*. Estas películas son una fuente natural de celulosa bacteriana, un material biodegradable y biocompatible que tiene numerosas aplicaciones en múltiples industrias, incluyendo la farmacéutica y la medicina. Se destaca que la celulosa bacteriana que se obtiene de las madres del vinagre es además un material de gran pureza, lo cual significa que no es necesario someterla a un tratamiento largo, complejo o costoso antes de poder usarla. En este artículo se abordan las ventajas de obtener celulosa bacteriana a partir de madres del vinagre. Adicionalmente, al final del artículo se propone una opción sustentable para obtener vinagre base a partir de desechos agroindustriales.

1.Introducción

Todos conocemos el vinagre, lo hemos usado como aderezo o como producto de limpieza en nuestros hogares. Lo que no todos saben es que este líquido de sabor agrio también guarda el potencial para crear papel, cartón, fibras textiles, cosméticos, alimentos y hasta medicinas, entre muchas otras cosas. Pero para entender cómo es que un ingrediente de cocina nos permite lograr todo esto, primero tenemos que comprender qué es el vinagre y de dónde viene.

El vinagre, cuyo nombre significa literalmente “vino agrio” (del latín *vinus*, que significa “vino”, y *acris*, que significa “agrio”), proviene del alcohol y se produce por medio de un proceso conocido como fermentación acética. Durante la fermentación acética, las bacterias de los géneros *Gluconobacter* y *Acetobacter* convierten el oxígeno y el alcohol de una sustancia alcohólica, como el vino o la sidra, en ácido acético, la sustancia que le da al vinagre su

característico sabor agrio. El alcohol, a su vez, proviene de otro proceso de fermentación llamado fermentación alcohólica, en el cuál, unos hongos microscópicos llamados levaduras convierten los azúcares de frutas y cereales en alcohol y dióxido de carbono (Karki 2023).

Así pues, el vinagre es el resultado de una doble fermentación, pero el proceso no termina ahí. Las bacterias del género *Acetobacter* pueden seguir fermentando el vinagre hasta producir unas natas conocidas como “madres del vinagre”.

Las madres del vinagre son unas películas gruesas y resistentes formadas en la superficie del vinagre tras prolongarse su fermentación acética durante algunos meses y están en su mayoría conformadas por un material conocido como celulosa. La celulosa, cuya estructura química se muestra en la Figura 1, es un polímero biodegradable y biocompatible con una gran capacidad de retención; y aunque contiene algunos productos secundarios de la fermentación, en general se le considera de alta pureza.

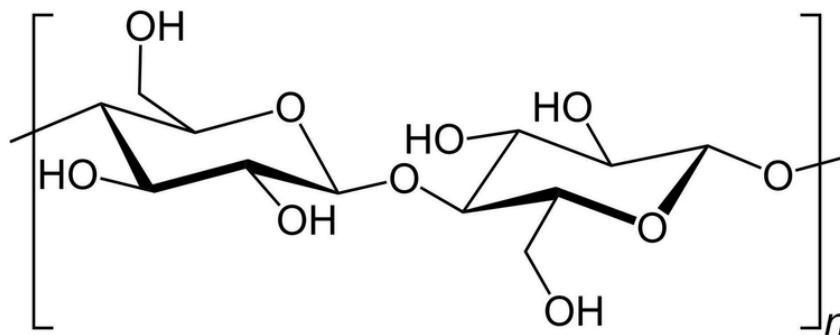


Figura 1. Estructura química de la celulosa.

Debido a estas propiedades, la celulosa tiene múltiples aplicaciones interesantes. Puede servir, por ejemplo, como materia prima para fabricar papel, cartón y telas. Puede usarse como soporte para partículas metálicas en materiales semiconductores y para retener los contaminantes en cuerpos acuíferos y contribuir a su remediación. En medicina se emplea como material de soporte quirúrgico y para implantes, y en las industrias farmacéutica y cosmética se utiliza para transportar medicinas y compuestos activos y aplicarlos en la parte del cuerpo donde el paciente lo necesita (Morales-Cepeda et al., 2024).



Foto: Qwazzme

En este punto es importante señalar que existen diferentes tipos de celulosa, la mayoría de las cuales se obtienen de las plantas, siendo algunos ejemplos las nanofibras de celulosa o los nanocristales de celulosa. El tipo de celulosa que conforma las madres de vinagre recibe el nombre de *nanocelulosa bacteriana*, o simplemente *celulosa bacteriana*, por los microorganismos que las fabrican. La celulosa bacteriana resulta de particular interés para la comunidad científica debido a que su grado de pureza es más alto que en las otras variedades de celulosa al no encontrarse combinada con otros polímeros

naturales que se encuentran en las plantas, como lo son la lignina, la pectina y la hemicelulosa (Wang et al., 2019).

Pero, ¿por qué la alta pureza de la celulosa bacteriana es tan interesante? Para responder esta pregunta primero tenemos que entender cómo se obtiene la celulosa.

Obtención y producción de la celulosa de origen no bacteriano

El viaje de la celulosa de origen no bacteriano comienza con el cultivo y colecta de la materia prima, que puede ser madera, algodón o incluso bambú, entre muchas otras.

En dependencia del tipo de material empleado, se elige un método de separación apropiado para aislar la celulosa de la materia prima. Normalmente se utiliza un método de separación mecánico como lo pueden ser la molienda, el triturado, el filtrado, o el tamizado, el cual suele combinarse con métodos de separación químicos asistidos por solventes ácidos o básicos, o métodos biológicos asistidos por enzimas (Radotić y Mičić, 2016).

Además, es necesario purificar y homogeneizar la celulosa, lo cual se logra con un conjunto de reacciones químicas y métodos mecánicos. Esto se debe a que la celulosa que se extrae directamente de las plantas viene mezclada con otros compuestos orgánicos, entre ellos la hemicelulosa, la lignina y la pectina, así como diversas impurezas tanto orgánicas como inorgánicas. Estos compuestos son difíciles de remover, y es necesario usar mezclas químicas fuertes, como la combinación de sosa con sulfuro de sodio, o incluso ácidos como el ácido sulfúrico para eliminarlos (Guarnizo-Franco et al., 2009; Magalhães et al., 2023).

A pesar de sus múltiples pasos, el proceso para obtener y purificar celulosa es considerado relativamente económico, el verdadero problema radica en su impacto ambiental, ocasionado por la tala de árboles y el cultivo de plantas como algodón o lino, que sirven como materia prima (Esa et al., 2014; Singhania et al., 2022). Esto sin mencionar la contaminación generada por los solventes químicos empleados durante su extracción y purificación, y las consecuencias del gasto energético durante la etapa de aislamiento mecánico.

Ahora puedes visualizar el impacto ambiental ocasionado por la producción del billón de toneladas de celulosa que se obtienen cada año alrededor del mundo (Phuong et al., 2022), la mayoría de la cual es obtenida a partir de plantas como el algodón, el lino, el cáñamo y el yute, así como de una gran variedad de árboles maderables (Bakri et al., 2022).

Volvamos entonces a la pregunta que nos planteamos arriba, ¿por qué la alta pureza de la celulosa bacteriana es tan interesante? Pues ocurre que la obtención de celulosa a partir de las bacterias nos permite saltarnos una gran cantidad de pasos enlistados, y reduce significativamente la cantidad de solventes químicos y métodos mecánicos que deben ser empleados para poder obtener un producto puro, listo para ser usado en alguna de sus múltiples aplicaciones.

Obtención y producción de la celulosa bacteriana

La obtención de celulosa bacteriana en forma de madres de vinagre, representada en la Figura 2, es un proceso mucho más sencillo y amigable para el medio ambiente.

El primer paso es obtener alcohol a partir de cualquier fruta o cereal, o incluso de otros tipos de plantas como hierbas o flores, siempre que contengan suficientes azúcares para que las levaduras puedan realizar la fermentación alcohólica. Es importante señalar que las plantas empleadas como material base para obtener el alcohol deberán estar sumergidas en agua y en un recipiente tapado. Lo primero es por conveniencia, ya que es más fácil trabajar con el alcohol y transportarlo cuando se encuentra diluido en agua. Lo segundo es necesario para que ocurra la reacción.

Resulta que las levaduras pueden vivir tanto en condiciones aerobias como anaerobias. Es decir, pueden vivir con o sin oxígeno. En condiciones normales, estos microorganismos obtienen la energía que necesitan para vivir directamente del oxígeno que se encuentra en el aire; pero si se bloquea su acceso al aire, pueden usar una ruta alternativa para sobrevivir. Las levaduras pueden descomponer las moléculas de glucosa (es decir, azúcar) contenidas en las frutas u otras plantas para obtener la energía que necesitan para vivir y reproducirse (Vázquez y Dacosta, 2007).

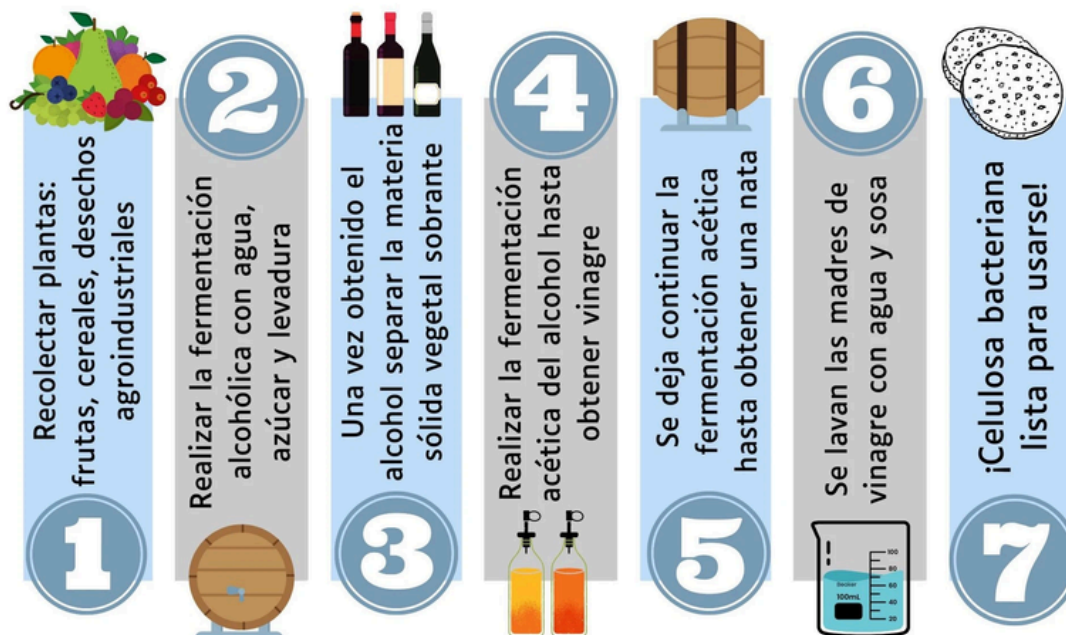
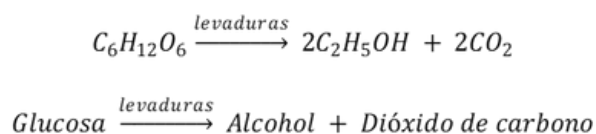


Figura 2. Proceso para obtener celulosa por medio de las madres de vinagre.

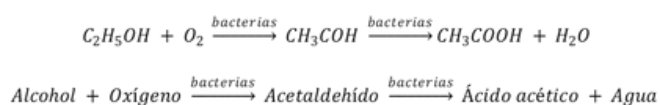
Esta reacción de descomposición da como resultado otros dos compuestos: el alcohol y el dióxido de carbono (¡de ahí que las bebidas alcohólicas sean burbujeantes!).

La reacción de la fermentación alcohólica se puede representar por medio de la siguiente ecuación química:



Es importante señalar que lo que se recupera de esta reacción es el destilado alcohólico, no la materia vegetal sólida.

Y una vez obtenido el destilado alcohólico, es hora de destapar el recipiente, porque las bacterias de los géneros *Gluconobacter* y *Acetobacter* sí necesitan el oxígeno para oxidar el alcohol y los azúcares sobrantes en la mezcla y así obtener en primer lugar un compuesto llamado acetaldehído, y posteriormente el ácido acético (Graham 2022). Este proceso se llama fermentación acética, y se puede representar por medio de la siguiente ecuación química:



Si se permite que la fermentación acética continúe durante un par de meses más, ya después de haber obtenido el vinagre, se obtendrán las madres de vinagre. Entonces las madres de vinagre se lavan con agua y sosa, y listo, así es como se obtiene celulosa a partir de vinagre.

No es necesario realizar operaciones mecánicas complejas ni tampoco emplear una gran cantidad de solventes y reactivos químicos para separar o aislar la celulosa del vinagre, ya que éste es líquido, así que basta con filtrar y enjuagar las natas con agua y sosa. Tampoco es necesario purificar u homogeneizar la celulosa bacteriana, ya que las madres de vinagre no contienen lignina ni pectina porque estos polímeros se quedan con la materia vegetal sólida que se desecha tras recuperar el alcohol. ¡Las madres de vinagre ya vienen casi listas para ser usadas!

Ahora seguramente te estarás preguntando, ¿pero es que acaso el impacto ambiental cultivar esas plantas para producir alcohol no es lo mismo que si se usaran para producir celulosa por medios tradicionales?

Recordemos que, si bien se necesitan plantas para producir alcohol, éstas no son la fuente primaria de las madres del vinagre sino el alcohol mismo. Es decir, que no se necesitan cultivos enteros o de alta calidad para llegar al resultado final, por lo que es posible usar desechos agroindustriales para obtener las madres de vinagre.

Oportunidades y mercado para la celulosa bacteriana

Actualmente ya existen algunas empresas que se enfocan en la producción de la celulosa bacteriana, por diferentes medios y con diferentes propósitos. Entre ellas se destacan Axcelon Biopolymers y Bowil Biotech, con sus sedes en Canadá y Polonia, respectivamente, que desarrollan biomateriales para uso en el campo de la biomedicina; Bioweg, en Alemania, que formula aditivos para alimentos, bebidas y cosméticos con diversos materiales biodegradables; y ScobyTec, también alemana, que se enfoca en obtener celulosa bacteriana para aplicaciones en el área textil y en la industria automotriz. De acuerdo con los analistas de mercado de The Insight Partners, se proyecta que el mercado de la celulosa bacteriana tenga un valor de 41.32 millones de dólares a nivel internacional para el año 2028 (Ummer 2023).

En México, la celulosa bacteriana también se está abriendo camino dentro del campo textil. En el año 2015, los hermanos mexicanos Axel y Alexis Gómez Ortigoza y su amiga Bárbara González Rolón se plantearon la idea de comenzar una empresa para fabricar biomateriales a partir de la celulosa bacteriana. Polybion fue establecido en León, Guanajuato, aunque actualmente su sede se encuentra en España, y produce celulosa bacteriana a partir de desechos agroindustriales de los cultivos de frutas locales. El producto final de la creatividad de

estos científicos y emprendedores mexicanos es el Celium, un textil similar al cuero que puede ser usado para fabricar carteras, ropa, calzado, y partes de automóviles, entre muchas otras cosas. Actualmente, los científicos de Polybion siguen explorando las propiedades del Celium, y en el año 2025 descubrieron que se pueden obtener diferentes grados de translucidez en el material, así como diferentes texturas, lo cual abre un nuevo abanico de posibilidades tan sólo para este textil (Mares 2026; Solís 2024).

En México, cada año se generan aproximadamente 76 millones de toneladas de desechos agroindustriales, siendo en su mayoría residuos de frutas y vegetales (González-Sánchez et al., 2015). Estos desechos no tienen la calidad necesaria para ser consumidos como alimento, pero con agua, bacterias, y mucha paciencia, podrían ayudarnos a producir miles de toneladas de madres de vinagre al año. Tan solo imagina todas las cosas que podríamos fabricar con tanta celulosa y el beneficio económico que ello podría representar para nuestros agricultores, y todo esto sin dañar el medio ambiente.

Referencias

- Bakri, M.K.B., Rahman, R., Chowdhury, F.I. (2022) Sources of cellulose. In *Fundamentals and Recent Advances in Nanocomposites Based on Polymers and Nanocellulose*. Oxford, England: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85771-0.00012-9>
- Esa, F., Tasirin, S.M., Rahman, N.A. (2014) Overview of Bacterial Cellulose Production and Application. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 113—119. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.017>
- González-Sánchez, M.E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., Yañez-Ocampo, G. (2015) Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229—235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>

Graham, K. (2022) Vinegar and Acetic Acid Fermentation. College of Saint Benedict/Saint John's University. Consultado el 10 de febrero de 2026. Obtenido de:

<https://chem.libretexts.org/@go/page/306243>

Guarnizo-Franco, A., Martínez-Yépes, P.N., Valencia-Sánchez, H.A. (2009) Biomass and cellulose pretreatments for saccharification. *Scientia et Technica*, 42, 284–289.

<https://doi.org/10.22517/23447214.2655>

Karki, K. (2023) Vinegar Fermentation: Definition, Process, Production. *Microbe Notes*. Consultado el 10 de febrero de 2026. Obtenido de:

<https://microbenotes.com/fermentation-of-vinegar/>

Magalhães, S., Fernandes, C., Pedrosa, J. F. S., Alves, L., Medronho, B., Ferreira, P. J. T., Rasteiro, M. d. G. (2023). Eco-Friendly Methods for Extraction and Modification of Cellulose: An Overview. *Polymers*, 15(14), 3138. <https://doi.org/10.3390/polym15143138>

Mares, A. (2026) La mexicana Polybion expande el alcance de Celium en moda y diseño durante 2025. *Fashion Network*. Consultado el 08 de febrero de 2026. Obtenido de:

<https://mx.fashionnetwork.com/news/La-mexicana-polybion-expande-el-alcance-de-celium-en-moda-y-diseno-durante-2025,1796289.html>

Morales-Cepeda, A.B., Díaz-Guerrero, A.M., Ledezma-Pérez, A.S., Alvarado-Canché, C.N., Rivera-Armenta, J.L. (2024) Bacterial cellulose from mother of vinegar loaded with silver nanoparticles as an effective antiseptic for wound-healing: antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Chemical Papers*. <https://doi.org/10.1007/s11696-024-03366-w>

Phuong, H.T., Thoa, N.K., Tuyet, P.T.A., Van, Q.N., Hai, Y.D. (2022) Cellulose Nanomaterials as a Future, Sustainable and Renewable Material. *Crystals*, 12(1), 106. <https://doi.org/10.3390/cryst12010106>

Radotić, K., Mičić, M. (2016). Methods for Extraction and Purification of Lignin and Cellulose from Plant Tissues. In: *Sample Preparation Techniques for Soil, Plant, and Animal Samples*. New York, USA: Springer Protocols Handbooks. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3185-9_26

Singhania, R.R., Patel, A.K., Tseng, Y.-S., Kumar, V., Chen, C.-W., Haldar, D., Saini, J.K., Dong, C.-D. (2022) Developments in bioprocess for bacterial cellulose production. *Bioresource Technology*, 344, 126343. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126343>

Solís, J. (2024) Celium™ de Polybion. Textiles paramericanos. Consultado el 08 de febrero de 2026. Obtenido de:

<https://textilespanamericanos.com/textiles-panamericanos/2024/11/celium-de-polybion/>

Ummer, H. (2023) Microbial Cellulose Market Key Players and Opportunities by 2028. *The Insight Partners*. Consultado el 08 de febrero de 2026. Obtenido de:

<https://www.theinsightpartners.com/reports/microbial-cellulose-market>

Vázquez, H.J., Dacosta, O. (2007) Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 8(4), 249–259.

Wang, J., Tavakoli, J., Tang, Y. (2019) Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review. *Carbohydrate Polymers*, 219, 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.05.008>

Sobre los autores

Dra. Abigail María Díaz Guerrero

Egresada de la Licenciatura en Ingeniería Química con especialidad en Ingeniería Ambiental por parte del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Cuenta con los grados de Maestra y Doctora en Tecnología Avanzada por parte del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, del Instituto Politécnico Nacional. Realizó una estancia posdoctoral en el Centro de Investigación en Petroquímica Secundaria, Campus 3, del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero/Tecnológico Nacional de México.

Dra. Ana Beatriz Morales Cepeda

La Dra. Morales obtuvo el título de ingeniera química y la maestría en ciencias, ambos en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Doctor en Ciencias por la Universidad de ULM en Alemania. Ingresó al Instituto Tecnológico en 1993, donde actualmente es investigadora permanente titular C. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel II. Sus líneas de investigación incluyen áreas relacionadas con la ingeniería química y los materiales.

Cita:

Díaz Guerrero, A. M., & Morales Cepeda, A. B. (2026). Vinagre: Una fuente natural, biodegradable y económica de celulosa bacteriana. *Biotechnológica Magazine*, 4(1), 29-34. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19072783>



Huanglongbing (HLB): Retos y Soluciones en la Citricultura Moderna

Felipe Ascencio y Gracia Gómez-Anduro
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
ascencio@cibnor.mx

Foto: Taryn Elliot

Tema

El HLB es una enfermedad de los cítricos con un siglo de antigüedad y distribución mundial que ha devastado la producción de cítricos en México, especialmente en regiones como Baja California Sur. Originaria de Asia, se transmite principalmente por psílidos y ha causado graves impactos económicos y sociales. A pesar de los importantes esfuerzos de investigación y manejo, el HLB sigue siendo una amenaza persistente, lo que subraya la necesidad de innovación continua para su detección, control y el mejoramiento genético de los cítricos que les confiera resistencia contra esta enfermedad. La investigación sobre HLB avanza rápidamente, pero se necesitan estudios interdisciplinarios, de campo y orientados al futuro para lograr un control sostenible y la resiliencia de la industria.

1.Introducción

El Huanglongbing (HLB), cuyo nombre significa "enfermedad del dragón amarillo" en chino, también conocido como enverdecimiento de los cítricos (Figura 1), es una devastadora enfermedad, producida por la bacteria Gram-negativa *Candidatus Liberibacter* (Figura 2), que se ha convertido en la mayor amenaza para la producción mundial de cítricos, incluida la de México. La enfermedad afecta diversas especies de cítricos, incluyendo limón, naranja, toronja, mandarina y limonaria, principalmente a los cítricos agrios con mayor severidad que en los dulces. El HLB es causado principalmente por la bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus* y se transmite por insectos vectores, principalmente el psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*) (Figura 3) y, en África, el psílido africano de los cítricos (*Trioza erytreae*) (Gottwald, 2010; Wang y Trivedi, 2013; Da Graça et al., 2016; Thakuria et al.,

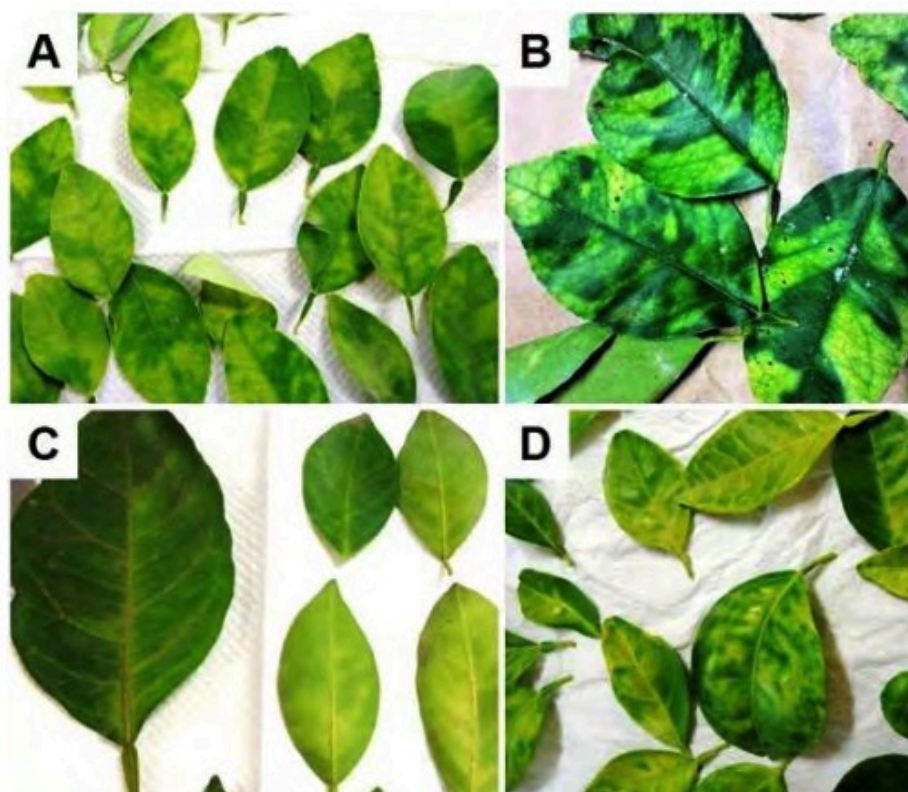


Figura 1. Síntomas de HLB en hojas de cítricos. A) Lima mexicana: amarillamiento seguido de manchado con manchas angulares asimétricas a ambos lados de la nervadura principal; B) Lima persa: engrosamiento de la nervadura central que causa un aspecto acorchado, presencia de islotes verdes y distorsión foliar; C) Mandarina: manchado difuso, aclaramiento y engrosamiento de las nervaduras; y D) Naranja dulce: acorchamiento y aclaramiento de las nervaduras, distorsión foliar y presencia de islotes verdes (Fuente: Soto-Plancarte et al., 2024).

2023; Reynaud et al., 2022). La enfermedad se originó en Asia, con los primeros informes en el sur de China e India a finales del siglo XIX y principios del XX, y desde entonces se ha extendido a África, América y otras regiones productoras de cítricos (Da Graça et al., 2016; Machado et al., 2025; Thakuria et al., 2023; Li et al., 2021). El HLB se detectó por primera vez en México en 2009, en la

península de Yucatán, y se propagó rápidamente a casi todos los estados productores de cítricos, incluyendo Baja California Sur (Villar-Luna et al., 2024; García-Ávila et al., 2021; Huang et al., 2022). La enfermedad se caracteriza por el amarilleamiento de las hojas, la deformación de los frutos, el debilitamiento del árbol y, finalmente, su muerte, lo que conlleva graves repercusiones económicas y sociales



para los productores de cítricos (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; García-Ávila et al., 2021; Salcedo et al., 2011). En México, el HLB ha provocado importantes reducciones en la producción, un aumento de los costos de producción y la pérdida de empleos, especialmente en las regiones que dependen en gran medida del cultivo de cítricos (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; García-Ávila et al., 2021; Salcedo et al., 2011).

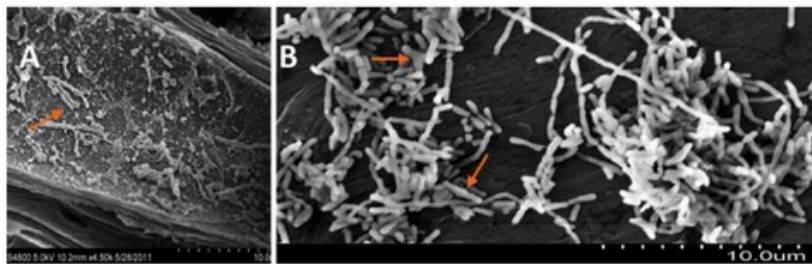


Figura 2. Micrografías de células de *Candidatus Liberibacter asiaticus*. A) Micrografía electrónica de barrido de una célula de floema de bígaro infectada con Las. B) Micrografía electrónica de barrido en gel de un co-cultivo de C.L. asiaticus (Fuente: Zheng et al., 2024).

Una vez que un árbol se infecta con HLB, desarrolla síntomas progresivos que incluyen moteado en las hojas, con zonas amarillas rodeadas de verde normal, engrosamiento de las nervaduras, acorchamiento, maduración irregular de los frutos, deformación y coloraciones variadas. Los árboles afectados pierden productividad de manera considerable y pueden morir en un período de 1 a 2 años cuando la enfermedad está establecida, aunque algunos pueden sobrevivir más tiempo en condiciones de manejo intensivo (CESAVE, 2017).

El HLB tiene su origen en China, donde fue descrito por primera vez entre 1870 y 1943. La enfermedad se originó probablemente en el sureste asiático, donde inicialmente afectó plantas nativas de la familia Rutaceae. Aunque existen reportes

de síntomas similares en India desde el siglo XVIII, el HLB, como enfermedad documentada científicamente, comenzó a reconocerse en China a finales del siglo XIX (López-San Juan et al., 2021).

Las bacterias se diseminan al alimentarse del floema de los cítricos, y la dispersión, tanto local como a larga distancia, se ve facilitada por el viento, el movimiento de material vegetal infectado y la migración del vector (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; Flores-Sánchez et al., 2017; López-Buenfil et al., 2017; Lee et al., 2015; Reynaud et al., 2022). La propagación asintomática y los prolongados periodos de incubación dificultan la detección y el control (Gottwald, 2010; Lee et al., 2015).

2. Impacto en la Citricultura de México

El impacto del HLB en la citricultura mexicana ha sido devastador desde su introducción en 2009. Para 2010-2011, se estimaba que la presencia del HLB representaba una amenaza para las 549 mil hectáreas sembradas de cítricos (el 40% de la superficie nacional), correspondientes a 23 entidades federativas con 69 mil productores involucrados, generando un valor de producción superior a 8 mil millones de pesos y 154 mil empleos directos (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; García-Ávila et al., 2021; Salcedo et al., 2011). En regiones específicas como Tecomán y Armería, en Colima, entre 2010 y 2014, el HLB provocó la conversión de alrededor de 5,000 hectáreas de plantaciones de cítricos a otros cultivos, lo que resultó en una disminución de aproximadamente 84,721 toneladas de limón y una pérdida económica de MX\$302,636,729 (CESVO, 2015). Investigaciones en Colima demostraron que en árboles con HLB cubriendo toda la copa, el rendimiento se redujo en 45.8 % comparado con árboles sin síntomas, pasando de 60.3 frutos/m² a 27.6 frutos/m² (Robles-González et al., 2017). En 2013, la presencia del HLB se confirmó en 222 municipios de 13 estados mexicanos y actualmente se encuentra presente en todos los estados citrícolas del país, siendo Colima el más afectado (CESVO, 2015).



Figura 3. El psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*) adulto y sus larvas invaden esta sección de la planta. Este insecto es portador de la bacteria que causa el enverdecimiento de los cítricos (Crédito de la imagen: Michael Rogers, <https://epi.ufl.edu/2025/11/10/citrus-greening-disease-in-florida-what-to-know/>)

La enfermedad ha generado restricciones en la movilización y comercialización de plantas y frutas cítricas, impactando no solo la producción primaria, sino también toda la cadena productiva, incluyendo empacadoras, procesadoras y exportaciones (CESVO, 2015).

2.1. Impacto Específico del HLB en Baja California Sur

Baja California Sur es una de las regiones citrícolas más importantes de México. El estado cuenta con 3,900 hectáreas destinadas al cultivo de naranjas y la generación de un volumen de producción de 40,000 toneladas, representando un valor muy alto que impacta significativamente las economías agrícolas locales. La enfermedad ha afectado particularmente a regiones con alta densidad de producción comercial de cítricos, como la región del Pacífico y Baja California Sur (Villar-Luna et al., 2024; Cervantes-Santos et al., 2025; García-Ávila et al., 2021; López-Buenfil et al., 2017; Salcedo et al., 2011; Huang et al., 2022).

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19075152>

El HLB fue detectado por vez primera en Baja California Sur en agosto de 2011, por lo que desde entonces, por lo que las autoridades sanitarias declararon al estado como zona bajo control fitosanitario. Las estrategias de manejo han incluido el control del vector, la eliminación de árboles infectados y la vigilancia regional, pero la enfermedad permanece, en gran medida, sin control (Villar-Luna et al., 2024; García-Ávila et al., 2021; López-Buenfil et al., 2017; Li et al., 2019; Hu et al., 2018). A partir de 2024, el estado ha intensificado las medidas preventivas y de control. Se reporta que la región del Pacífico en México, que incluye a Baja California Sur, se considera de alto riesgo epidémico e impacto comercial por el HLB debido a la ocurrencia e intensidad de la enfermedad (López-San Juan et al., 2021). Las autoridades estatales, a través de la Secretaría de Pesca, Acuicultura y Desarrollo Agropecuario (SEPADA), han reconocido que la producción de 40,000 toneladas de cítricos en la entidad está bajo amenaza significativa por la presencia del HLB, sin cura disponible, pero controlable mediante manejo

agronómico integral y el monitoreo del vector. Se han establecido campañas de prevención con el Comité Estatal de Sanidad Vegetal (CESV), instalación de trampas para monitoreo del vector *Diaphorina citri*, inspecciones de huertos y promoción de prácticas agronómicas que incluyen nutrición balanceada para mantener vigor de los árboles.

3. Temas de actualidad en investigación y el desarrollo tecnológico del HLB

El Huanglongbing (HLB), o enfermedad del enverdecimiento de los cítricos, es la enfermedad más destructiva que afecta a los cítricos en todo el mundo, causando graves pérdidas económicas y amenazando la sostenibilidad de la industria citrícola (Huang et al., 2021; Limayem et al., 2024; Zhou, 2020; Ghosh et al., 2022). La investigación sobre HLB se ha expandido rápidamente (Tabla 1), abarcando la biología del patógeno, las tecnologías de detección temprana, la resistencia de las plantas, la terapia de fagos, el manejo integrado, los impactos socioeconómicos, los marcos regulatorios y la influencia del cambio climático (Huang et al., 2021; Alquézar et al., 2021; Limayem et al., 2024; Kennedy et al., 2023; Mubeen et al., 2024; Machado et al., 2025; Yin et al., 2025; Hu et al., 2021; Zhou, 2020; Lee et al., 2015; Li et al., 2021; Munir et al., 2018; Yang et al., 2024; Ghosh et al., 2022). Los avances tecnológicos incluyen diagnóstico molecular, teledetección, inteligencia artificial e innovaciones biotecnológicas para la resistencia a enfermedades y el control de vectores (Ye et al., 2025; Ghosh et al., 2018; Machado et al., 2025; Zhou et al., 2025; Qiu et al., 2022; Morán et al., 2023; Zhang et al., 2024; Dong et al., 2025; Li et al., 2021; Zou et al., 2021). La investigación socioeconómica y regulatoria destaca la necesidad de políticas coordinadas, de adaptación económica y de estrategias de gestión sostenible (Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018). El

cambio climático se reconoce cada vez más como un factor que influye en la epidemiología del HLB, la dinámica de sus vectores y el riesgo futuro, lo que exige una gestión adaptativa y la investigación en este campo (Morán et al., 2023; Li et al., 2021; Yang et al., 2024) (Tabla 2).

3.1. Avances tecnológicos en la detección y el diagnóstico de HLB

En los últimos años se ha observado un progreso significativo en la detección de HLB, incluyendo diagnósticos moleculares (qPCR, amplificación isotérmica), biosensores y ensayos desplegables en campo (Ye et al., 2025; Ghosh et al., 2018; Qiu et al., 2022; Morán et al., 2023; Zhang et al., 2024; Xu et al., 2023; Dong et al., 2025; Thakuria et al., 2023; Huang et al., 2023; Martinelli et al., 2012; Valdés et al., 2016; Orjuela et al., 2020; Paudyal, 2016). La teledetección, la imagen hiperespectral y la inteligencia artificial (IA) han permitido la detección temprana, no destructiva y de alto rendimiento de la enfermedad de la mancha foliar herbívora (HLB) en huertos (Ye et al., 2025; Qiu et al., 2022; Dong et al., 2025; He et al., 2022; Yang et al., 2021). Se están desarrollando aplicaciones móviles y dispositivos portátiles para un diagnóstico de campo rápido y sencillo (Qiu et al., 2022; He et al., 2022). Los avances en la fusión de características multimodales y el aprendizaje automático han mejorado la precisión y la fiabilidad (Ye et al., 2025; Dong et al., 2025; Yang et al., 2021).

3.2. Innovaciones en el manejo de HLB y la resistencia de las plantas

Las estrategias de manejo integrado se centran en el patógeno, el hospedero y el vector, e incluyen péptidos antimicrobianos, nanotecnología, sistemas de inyección al tronco y enfoques biotecnológicos como la edición genética, la resistencia transgénica y fagoterapia (Huang et al., 2021; Alquézar et al., 2021; Limayem et al., 2024; Kennedy et al., 2023; Mubeen et

Tabla 1. Línea de Tiempo de Principales Hallazgos en la Investigación del HLB

Año	Descubrimiento
1919	Primera descripción en China (entonces denominada "huanglongbing", o "dragón amarillo") (Lin, 1956).
1920 a 1960	La enfermedad se reconoce en África y Asia; el agente causal se identifica como una bacteria limitada al floema (Da Graça <i>et al.</i> , 2016; Machado <i>et al.</i> , 2025; Thakuria <i>et al.</i> , 2023).
1970	Identificación del patógeno mediante microscopía electrónica; se confirma su naturaleza bacteriana no cultivable (Garnier <i>et al.</i> , 1984).
1990s	Uso de PCR para detectar <i>Ca. Liberibacter</i> , revolucionando el diagnóstico (Gottwald <i>et al.</i> , 2007).
2005	Detección en Florida (EE.UU.), desencadenando una crisis en la industria citrícola estadounidense (USDA-APHIS, 2005).
2009	Confirmación en México (Yucatán), extendiéndose rápidamente a 28 estados (SENASICA, 2010).
2015	Primer caso reportado en Baja California Sur (SADER-BCS, 2021).
Década de los 2020s	La investigación se centra en la biología de la transmisión, el control de vectores, las interacciones moleculares y las estrategias de manejo (Villar-Luna <i>et al.</i> , 2024; Cervantes-Santos <i>et al.</i> , 2025; Younas <i>et al.</i> , 2025; Ghosh <i>et al.</i> , 2022; Hu <i>et al.</i> , 2021; Hu <i>et al.</i> , 2025; Li <i>et al.</i> , 2019; Hu <i>et al.</i> , 2018; Huang <i>et al.</i> , 2021).
2025	Se propone la terapia de fagos para contrarrestar enfermedades bacterianas en plantas (Grace <i>et al.</i> , 2021), y se analizaron 191 secuencias de pro fagos en 48 genomas de <i>Liberibacter</i> , uno de los cuales mostró potencial para ser usado en terapia de fagos y eliminar la bacteria <i>Candidatus Liberibacter asiaticus</i> , causante de HLB (Zheng <i>et al.</i> , 2023; Yin <i>et al.</i> , 2025).

al., 2024; Machado et al., 2025; Zhou et al., 2025; Ojo et al., 2024; Cheng et al., 2023; Wenxiu et al., 2022; Li et al., 2021; Tiwari et al., 2024; Zhao et al., 2025; Aksenov et al., 2024; Zou et al., 2021; Ghosh et al., 2022; Yin et al., 2025; Zou et al., 2017). Los nuevos compuestos (por ejemplo, péptidos antimicrobianos estables, aceites esenciales y bioflavonoides) y los métodos de administración (por ejemplo, inyección al tronco, pulverizaciones foliares con potenciadores de la permeación) son prometedores tanto para el tratamiento como para la prevención (Huang et al., 2021; Zhou et al., 2025; Ojo et al., 2024; Wenxiu et al., 2022; Aksenov et al., 2024; Chen et al., 2024; Zou et al., 2017). Los estudios genéticos y transcriptómicos han identificado genes clave de resistencia y redes reguladoras, lo que respalda el mejoramiento y la ingeniería de cultivos tolerantes a HLB (Alquézar et al., 2021; Machado et al., 2025; Hu et al., 2021; Cheng et al., 2023; Tiwari et al., 2024; Zhao et al., 2025; Zou et al., 2021; Zou et al., 2017).

3.3. Investigación socioeconómica y regulatoria

HLB ha causado pérdidas económicas multimillonarias, lo que ha impulsado la investigación sobre los impactos socioeconómicos, las respuestas regulatorias y la adaptación de la industria (Limayem et al., 2024; Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018). Las políticas regulatorias se centran en la cuarentena, el control de vectores, la eliminación de árboles infectados y la certificación de material de plantación libre de enfermedades (Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018). Los análisis económicos resaltan la necesidad de una gestión rentable y sostenible, así como la importancia de la intervención gubernamental y de la colaboración del sector productivo (Limayem et al., 2024; Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018).

3.4. Perspectivas del cambio climático y riesgos futuros

Se prevé que el cambio climático altere la epidemiología del HLB, la distribución de vectores y el riesgo de la enfermedad, lo que exige estrategias de gestión adaptativa (Morán et al., 2023; Li et al., 2021; Yang et al., 2024). La investigación se centra cada vez más en modelar el riesgo futuro, comprender el impacto de la temperatura y de los patrones climáticos en la propagación de enfermedades y desarrollar enfoques de gestión resilientes al clima (Morán et al., 2023; Li et al., 2021; Yang et al., 2024).

4. Futuras líneas de investigación, incluidas las perspectivas del cambio climático, en la lucha global contra el HLB

El panorama de la investigación sobre HLB se caracteriza por una rápida innovación tecnológica, enfoques interdisciplinarios y una creciente integración de perspectivas socioeconómicas y regulatorias (Huang et al., 2021; Alquézar et al., 2021; Limayem et al., 2024; Kennedy et al., 2023; Mubeen et al., 2024; Machado et al., 2025; Hu et al., 2021; Zhou, 2020; Lee et al., 2015; Li et al., 2021; Munir et al., 2018; Yang et al., 2024; Ghosh et al., 2022). Los avances en el diagnóstico molecular, la teledetección y la inteligencia artificial han revolucionado la detección temprana, mientras que las innovaciones biotecnológicas y químicas ofrecen nuevas esperanzas para el manejo de enfermedades y la generación de resistencia (Huang et al., 2021; Ye et al., 2025; Alquézar et al., 2021; Machado et al., 2025; Zhou et al., 2025; Qiu et al., 2022; Morán et al., 2023; Ojo et al., 2024; Cheng et al., 2023; Wenxiu et al., 2022; Li et al., 2021; Tiwari et al., 2024; Zhao et al., 2025; Aksenov et al., 2024; Chen et al., 2024; Zou et al., 2021; He et al., 2022; Zou et al., 2017, 2021).

Tabla 2. Temas de actualidad en investigación y el desarrollo tecnológico del HLB (Fuente: referencias citadas en el Punto No. 3)

Estrategias	Investigación Científica y Desarrollos Tecnológicos
Control y manejo de vectores (Combate al psílido asiático de los cítricos) Desarrollo de bactericidas y terapias (Eliminación de la bacteria dentro del árbol)	• Nuevos insecticidas y rotación: Desarrollo de nuevas clases de productos químicos y optimización de los programas de aplicación para combatir la resistencia del psílido. • Control biológico: Cría masiva y liberación de depredadores naturales del PAC, como la avispa parasitoide <i>Tamarixia radiata</i>. Este es un pilar fundamental de los Programas de Manejo Regional. • Repelentes y barreras contra el psílido: Aplicación de películas de caolín o de partículas para recubrir los árboles, haciéndolos menos reconocibles o atractivos para que los psíidos se posen y se alimenten. • Interferencia de ARN (ARNi): Un tema de gran actualidad. Desarrollo de aerosoles o plantas genéticamente modificadas que producen ARN de doble cadena (ARNdc) para silenciar genes críticos en el psílido, eliminándolo o impidiendo que transmita la bacteria. • Péptidos antimicrobianos (AMP): Modificar genéticamente los árboles para que produzcan sus propios compuestos antibacterianos o aplicarlos mediante inyección al tronco. Esta es un área importante de la investigación biotecnológica. • Terapéutica con moléculas pequeñas: Analizar extensas bibliotecas de compuestos químicos para encontrar aquellos que puedan eliminar la bacteria o inhibir su crecimiento. Compuestos como la benzobromarona han mostrado resultados prometedores en investigación. • Termoterapia: Utilizar calor (por ejemplo, vapor, agua caliente o energía solar) para debilitar la bacteria sin dañar el árbol. Se está optimizando para su uso comercial. • Nanoemulsiones y sistemas de administración: Desarrollo de métodos innovadores para administrar terapias de forma eficaz al sistema vascular del árbol, a menudo utilizando nanotecnología para proteger el ingrediente activo y mejorar su movilidad. • Fagoterapia: Utiliza fagos, los cuales son virus que matan bacterias, para atacar de forma específica a la bacteria causante de HLB. A la fecha se han analizado 191 secuencias de pro fagos en 48 genomas de <i>Liberibacter</i>, de los cuales 19 son fagos activos y uno mostró potencial para ser utilizado en terapia de fagos.
Resistencia y tolerancia de la planta huésped (Desarrollo de árboles más resistentes)	• Edición genética (CRISPR-Cas9): Un tema de gran actualidad. Los investigadores utilizan CRISPR para editar los genes de variedades comerciales de cítricos y hacerlas resistentes. Los objetivos incluyen genes que predisponen a la planta a la enfermedad o genes de especies relacionadas que confieren resistencia. • Enfoques transgénicos: Inserción de genes de otros organismos (como el gen defensivo de la espinaca o el gen NPR1 de la planta <i>Acacia thaliana</i>) en los cítricos para proporcionar resistencia. Si bien han demostrado ser eficaces en ensayos clínicos, aún existen obstáculos regulatorios y de aceptación pública. • Mejoramiento convencional y desarrollo de portainjertos: Selección de extensas colecciones de
Resistencia y tolerancia de la planta huésped (Desarrollo de árboles más resistentes)	• Edición genética (CRISPR-Cas9): Un tema de gran actualidad. Los investigadores utilizan CRISPR para editar los genes de variedades comerciales de cítricos y hacerlas resistentes. Los objetivos incluyen genes que predisponen a la planta a la enfermedad o genes de especies relacionadas que confieren resistencia. • Enfoques transgénicos: Inserción de genes de otros organismos (como el gen defensivo de la espinaca o el gen NPR1 de la planta <i>Acacia thaliana</i>) en los cítricos para proporcionar resistencia. Si bien han demostrado ser eficaces en ensayos clínicos, aún existen obstáculos regulatorios y de aceptación pública. • Mejoramiento convencional y desarrollo de portainjertos: Selección de extensas colecciones de germoplasma (como <i>Poncirus trifoliata</i> y especies relacionadas) para identificar tolerancia o resistencia natural y su posterior mejoramiento para obtener injertos y portainjertos comercialmente viables. El portainjerto USDA US-942 es un ejemplo exitoso de este método, ya que ofrece una mayor tolerancia. • Comprensión de la interacción planta-microbio: Investigación fundamental sobre cómo las bacterias causan enfermedades, qué genes y rutas metabólicas de la planta están involucrados e identificación de mecanismos de tolerancia natural en ciertas variedades de cítricos o especies relacionadas.
Agricultura de precisión y detección temprana	• Imágenes espectrales y teledetección: Uso de drones, aviones y satélites con sensores hiperspectrales y multispectrales para detectar cambios sutiles en la salud de la copa de los árboles antes de que los síntomas sean visibles a simple vista. • Detección olfativa canina: Entrenamiento de perros para identificar árboles infectados con HLB mediante el olfato con una precisión y velocidad notables, a menudo mucho antes que otros métodos de detección. • Biosensores y pruebas rápidas de campo: Desarrollo de dispositivos portátiles o tiras reactivas químicas que detectan rápidamente la presencia de ADN bacteriano o una firma metabólica de la enfermedad en el campo, eliminando la necesidad de pruebas PCR de laboratorio. • IA y aprendizaje automático: Uso de inteligencia artificial para analizar grandes volúmenes de datos provenientes de imágenes espectrales y redes de sensores, con el fin de mapear y predecir con precisión brotes de enfermedades.
Enfoques holísticos y basados en el microbioma	• Ingeniería del microbioma del floema: Estudio de la comunidad de otros microbios que habitan en el floema de la planta. El objetivo es introducir bacterias beneficiosas que puedan competir con la bacteria HLB o inhibirla. • Endófitos y microbios beneficiosos: Aplicación de hongos y bacterias beneficiosos a las raíces u hojas para estimular el sistema inmunitario de la planta (resistencia sistémica inducida) o antagonizar directamente al patógeno. • Terapias nutricionales y bioestimulantes: Si bien no constituyen una cura, optimizar los programas de nutrición mejorada con micronutrientes específicos, promotores del crecimiento vegetal y enmiendas del
Investigación Socioeconómico y Regulatoria	• Análisis de Costo-Beneficio: Evaluar la viabilidad económica de las nuevas tecnologías para los productores. • Vías Regulatorias: Colaborar con agencias (como la EPA y el USDA) para establecer vías claras de aprobación de nuevas herramientas, especialmente plaguicidas basados en ARN de interferencia (ARNi) y árboles editados genéticamente. • Aceptación por Productores y Consumidores: Comprender y abordar las barreras para la adopción de nuevas tecnologías, particularmente la ingeniería genética.

Sin embargo, persisten desafíos, como la falta de una cura, la complejidad del sistema patógeno-huésped-vector y la necesidad de soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Huang et al., 2021; Alquézar et al., 2021; Limayem et al., 2024; Kennedy et al., 2023; Mubeen et al., 2024; Machado et al., 2025; Hu et al., 2021; Zhou, 2020; Lee et al., 2015; Li et al., 2021; Munir et al., 2018; Yang et al., 2024; Ghosh et al., 2022; Zou et al., 2017). La investigación socioeconómica subraya la importancia de la acción regulatoria coordinada, la adaptación del sector y el apoyo económico a los productores (Limayem et al., 2024; Zhou, 2020; Li et al., 2021; Munir et al., 2018). El cambio climático añade mayor complejidad, lo que exige una gestión adaptativa e investigación orientada al futuro (Morán et al., 2023; Li et al., 2021; Yang et al., 2024).

Tabla 3. Principales preguntas de investigación abiertas para futuros estudios sobre el HLB.

Pregunta	¿Por qué?
¿Cómo se pueden optimizar las estrategias de manejo específicas para cada región para el control del HLB en México?	Las diferencias regionales en clima, poblaciones de vectores y variedades de cítricos requieren enfoques adaptados a cada caso.
¿Qué soluciones genéticas o biotecnológicas pueden proporcionar resistencia duradera al HLB en los cítricos?	No existen cultivares resistentes; los avances podrían transformar el manejo de la enfermedad y la supervivencia de la industria.
¿Cómo influye el microbioma de los cítricos en la progresión del HLB y el potencial de biocontrol?	Comprender las interacciones planta-microbio puede revelar nuevas estrategias sostenibles de mitigación de la enfermedad.
¿Qué tan efectivos son los nuevos métodos de detección biotecnológicos y basados en IA en huertos de cítricos a gran escala y en condiciones reales?	La validación de campo es esencial para garantizar que los avances de laboratorio se traduzcan en soluciones prácticas y escalables para los productores.
¿Cuáles son los impactos socioeconómicos a largo plazo del HLB y las intervenciones regulatorias en las industrias de cítricos en diferentes regiones?	Comprender la adaptación económica y la efectividad de las políticas permitirá una gestión sostenible y el apoyo a las comunidades afectadas.
¿Cómo alterará el cambio climático la epidemiología del HLB y qué estrategias de gestión adaptativa son las más efectivas?	Anticipar los riesgos futuros y desarrollar enfoques resilientes al clima es fundamental para el control de la enfermedad a largo plazo.

4.1. Brechas en la investigación

Si bien se conoce mucho sobre la biología, la transmisión y el impacto de la HLB, aún existen lagunas en la comprensión de la epidemiología regional, el manejo eficaz a largo plazo y el desarrollo de cultivares resistentes, especialmente en el contexto de la citricultura mexicana (Tabla 2). A pesar de los avances, persisten brechas en la validación de campo de las nuevas tecnologías, en la eficacia a largo plazo de las estrategias de resistencia, en la adaptación socioeconómica y en el manejo resiliente al clima. Asimismo, se requiere un mayor número de estudios interdisciplinarios y específicos para cada región.

4.2. Preguntas de investigación abiertas

Las investigaciones futuras deberían centrarse en la validación de campo de las nuevas tecnologías, el monitoreo a largo plazo de las estrategias de resistencia, la adaptación socioeconómica y la gestión resiliente al clima (Tabla 3).

5. Conclusión

La investigación sobre la enfermedad Huanglongbing o HLB (HLB, por sus siglas en inglés, o enverdecimiento de los cítricos) se encuentra a la vanguardia de la fitopatología, integrando tecnología de punta, análisis socioeconómico y adaptación climática. Si bien se han logrado avances significativos en la detección, el manejo y la

comprensión de la enfermedad, aún persisten importantes desafíos, particularmente en el desarrollo de resistencia duradera, manejo sostenible y marcos regulatorios eficaces.

6. Literatura citada

Aksenov, A., Blacutt, A., Ginnan, N., et al. (2024). Spatial chemistry of citrus reveals molecules bactericidal to *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70499-z>

Alquézar, B., Carmona, L., Bennici, S., Peña, L. (2021). Engineering of citrus to obtain huanglongbing resistance. *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.06.003>

Cervantes-Santos, J., Villar-Luna, H., Bojórquez-Orozco, et al. (2025). Huanglongbing as a Persistent Threat to Citriculture in Latin America. *Biology*, 14. <https://doi.org/10.3390/biology14040335>

Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Oaxaca, CESVO. (2015). Campaña Contra Huanglongbing de los Cítricos. <http://www.cesvo.org.mx/hlb/>

Comité Estatal de Sanidad Vegetal, CESAVER. (2017). Huanglongbing de los Cítricos "HLB" (*Candidatus Liberibacter* spp.). <https://cesave.org.mx/huanglongbing-de-los-citricos-hlb-candidatus-liberibacter-spp/>

Chen, S., Yuan, A., Wang, H., et al. (2024). Enhancing agrochemical delivery in citrus leaves with geraniol: a promising strategy for controlling huanglongbing (HLB). *Pest Management Science*. <https://doi.org/10.1002/ps.8526>

Cheng, B., Xu, L., Bilal, M., et al. (2023). Small RNAs contribute to citrus Huanglongbing tolerance by manipulating methyl salicylate signaling and exogenous methyl salicylate primes citrus groves from emerging infection. *The Plant Journal for Cell and Molecular Biology*. <https://doi.org/10.1111/tpj.16426>

Da Graça, J., Douhan, G., Halbert, S., et al. (2016). Huanglongbing: An overview of a complex pathosystem ravaging the world's citrus. *Journal of Integrative Plant Biology*, 58 4, 373-87. <https://doi.org/10.1111/jipb.12437>

Dong, R., Shiraiwa, A., Ichinose, K., et al. (2025). Hyperspectral Imaging and Machine Learning for Huanglongbing Detection on Leaf-Symptoms. *Plants*, 14. <https://doi.org/10.3390/plants14030451>

Flores-Sánchez, J., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., et al. (2017). Diffusion Model for Describing the Regional Spread of Huanglongbing from First-Reported Outbreaks and Basing an Area Wide Disease Management Strategy. *Plant Disease*, 101 7, 1119-1127. <https://doi.org/10.1094/pdis-04-16-0418-re>

García-Ávila, C., Trujillo-Arriaga, F., Quezada-Salinas, et al. (2021). Holistic Area-Wide Approach for Successfully Managing Citrus Greening (Huanglongbing) in Mexico. In: Hendrichs J., Pereira R., Vreysen M.J.V. (Eds). *Area-wide Integrated Pest Management*. CRC Press, pp. 33-49. <https://doi.org/10.1201/9781003169239-4>

Garnier M, Danel N., Bové M. (1984). The greening organism is a gram-negative bacterium. En *Proceedings of 9th Conference of the International Organization of Citrus Virologist*. Riverside, University of California. p 115-124. <https://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/00000469.pdf>

Ghosh, D., Kokane, S., Kokane, A., et al. (2018). Development of a recombinase polymerase based isothermal amplification combined with lateral flow assay (HLB-RPA-LFA) for rapid detection of "Candidatus *Liberibacter asiaticus*". *PLoS ONE*, 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208530>

Ghosh, D., Kokane, S., Savita, B., et al. (2022). Huanglongbing Pandemic: Current Challenges and Emerging Management Strategies. *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12010160>

- Gottwald, T. (2010). Current epidemiological understanding of citrus Huanglongbing. Annual Review of Phytopathology, 48, 119-39. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114418>
- Grace, E.R., Rabiey, M., Friman, et al. (2021) Seeing the forest for the trees: Use of phages to treat bacterial tree diseases. Plant Pathology, 70, 1987–2004. <https://doi.org/10.1111/ppa.13465>
- He, C., Li, X., Liu, Y., et al. (2022). Combining multicolor fluorescence imaging with multispectral reflectance imaging for rapid citrus Huanglongbing detection based on lightweight convolutional neural network using a handheld device. Comput. Electron. Agric., 194, 106808. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106808>
- Hu, B., Rao, M., Deng, X., et al. (2021). Molecular signatures between citrus and *Candidatus Liberibacter asiaticus*. PLoS Pathogens, 17. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1010071>
- Hu, J., Jiang, J., Wang, N. (2018). Control of Citrus Huanglongbing via Trunk Injection of Plant Defense Activators and Antibiotics. Phytopathology, 108 2, 186-195. <https://doi.org/10.1094/phyto-05-17-0175-r>
- Hu, Y., Lu, N., Bao, K., et al. (2025). Swords and shields: the war between *Candidatus Liberibacter asiaticus* and citrus. Frontiers in Plant Science, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1518880>
- Huang, C., Araujo, K., Sánchez, J., et al. (2021). A stable antimicrobial peptide with dual functions of treating and preventing citrus Huanglongbing. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2019628118>
- Huang, J., Alanís-Martínez, I., Kumagai, L., et al. (2022). Machine learning and analysis of genomic diversity of “*Candidatus Liberibacter asiaticus*” strains from 20 citrus production states in Mexico. Frontiers in Plant Science, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1052680>
- Huang, W., Zhong, Z., Lin, Z., et al. (2023). An inhibitor-monitorable single-tube duplex quantitative real-time PCR assay for the detection of *Candidatus Liberibacter asiaticus*. Plant Disease. <https://doi.org/10.1094/pdis-09-22-2168-sr>
- Kennedy, J., Wood, K., Pitino, M., et al. (2023). A perspective on current therapeutic molecule screening methods against *Candidatus Liberibacter asiaticus*, the presumed causative agent of citrus Huanglongbing. Phytopathology. <https://doi.org/10.1094/phyto-12-22-0455-per>
- Lee, J., Halbert, S., Dawson, W., et al. (2015). Asymptomatic spread of huanglongbing and implications for disease control. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112, 7605-7610. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508253112>
- Li, J., Li, L., Pang, Z., et al. (2019). Developing Citrus Huanglongbing (HLB) Management Strategies Based on the Severity of Symptoms in HLB-Endemic Citrus-Producing Regions. Phytopathology, 109 4, 582-592. <https://doi.org/10.1094/phyto-08-18-0287-r>
- Li, X., Ruan, H., Zhou, C., et al. (2021). Controlling Citrus Huanglongbing: Green Sustainable Development Route Is the Future. Frontiers in Plant Science, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.760481>
- Limayem, A., Martin, E., Shankar, S. (2024). Study on the citrus greening disease: Current challenges and novel therapies. Microbial Pathogenesis, 106688. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.106688>
- Lin Kung Hsang. 1956. Yellow shoot of citrus. Symptomatology. Investigations in the cause of huanglongbing. Natural transmission and spread. General conclusions. Acta Phytopathologica Sinica 2: 1-42.
- Lopez-Buenfil, J., Ramirez-Pool, J., Ruiz-Medrano, R., et al. (2017). Dynamics of Huanglongbing-associated Bacterium *Candidatus Liberibacter asiaticus* in *Citrus aurantifolia* Swingle (Mexican Lime). Pakistan Journal of Biological Sciences: PJBS, 20 3, 113-123. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2017.113.123>

- López-San Juan M.P., Ortega-Arenas L.D., López-Buenfil J.A., et al. (2021). Endosymbionts associated with *Diaphorina citri*, vector of *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(1), 43-54. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2019.12.022>
- Machado, R., Moschen, S., Conti, G., et al. (2025). Exploring the Genetic Networks of HLB Tolerance in Citrus: Insights Across Species and Tissues. *Plants*, 14. <https://doi.org/10.3390/plants14121792>
- Martinelli, F., Uratsu, S., Albrecht, U., et al. (2012). Transcriptome Profiling of Citrus Fruit Response to Huanglongbing Disease. *PLoS ONE*, 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038039>
- Morán, F., Herrero-Cervera, M., Carvajal-Rojas, S., Marco-Noales, E. (2023). Real-time on-site detection of the three *Candidatus Liberibacter* species associated with HLB disease: a rapid and validated method. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1176513>
- Mubeen, M., Ali, A., Iftikhar, Y., et al. (2024). Innovative strategies for characterizing and managing huanglongbing in citrus. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 40 11, 342. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-04135-3>
- Munir, S., He, P., Wu, Y., et al. (2018). Huanglongbing Control: Perhaps the End of the Beginning. *Microbial Ecology*, 76, 192-204. <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1123-7>
- National Academies (2020). Genetically Engineered Resistance to HLB <https://nap.nationalacademies.org/catalog/25797/genetically-engineered-resistance-to-citrus-huanglongbing-disease>
- Ojo, I., Ampatzidis, Y., Neto, A., Batuman, O. (2024). Development of an automated needle-based trunk injection system for HLB-affected citrus trees. *Biosystems Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.03.003>
- Orjuela, W., Echeverry, W., Pedraza, R. (2020). Identificación de tecnologías y métodos para la detección temprana del Huanglongbing (HLB) a través de cienciometría en artículos científicos y patentes. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 21 (2): e1208. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num2_art:1208
- Paudyal, K. (2016). Technological Advances in Huanglongbing (HLB) or Citrus Greening Disease Management. *Journal of Nepal Agricultural Research Council*, 1, 41-50. <https://doi.org/10.3126/jnarc.v1i0.15735>
- Qiu, R., Chen, S., Chi, M., et al. (2022). An automatic identification system for citrus greening disease (Huanglongbing) using a YOLO convolutional neural network. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002606>
- Reynaud, B., Turpin, P., Molinari, F., et al. (2022). The African citrus psyllid *Trioza erytreae*: An efficient vector of *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1089762>
- Robles-González M.M., Orozco-Santos M., Manzanilla-Ramírez M.A., et al. (2017). Efecto del HLB sobre el rendimiento de limón mexicano en Colima, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(5):1101-1111. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/111>
- SADER-BCS (2021). Impacto del HLB en Baja California Sur. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/sader/acciones-y-programas/impacto-del-hlb-en-bcs>
- Salcedo, D., Mora, G., Covarrubias, I., et al. (2011). Assessment of the Economic Impact of Huanglongbing (HLB) disease on Mexico's Citrus Chain. *Comunica online*, 7: 1-9. [file:///Users/felipeascenciovalle/Downloads/Assessment of the Economic Impact of Hua.pdf](file:///Users/felipeascenciovalle/Downloads/Assessment%20of%20the%20Economic%20Impact%20of%20Hua.pdf)

- Samiei, F. Fotoohiyan, Z., Salehi-Sardoei A. *et al.* (2024). Phage Therapy: Application in Plant Disease Control. In: Parray, J.A. (eds) Progress in Soil Microbiome Research. Progress in Soil Science. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71487-0_11
- SENASICA (2010). HLB en México: Diagnóstico y estrategias. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/hlb-en-mexico-diagnostico-y-estrategias>
- Soto-Plancarte A., Santillán-Mendoza R., Rodríguez-Alvarado G., Fernández-Pavía S.P., Hernández-Macías B., Alanis-Martínez E. 2024. Métodos de detección de Huanglongbing en cítricos». Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 15(4). ME:e3300. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i4.3300>
- Thakuria, D., Chaliha, C., Dutta, P., *et al.* (2023). Citrus Huanglongbing (HLB): Diagnostic and management options. Physiological and Molecular Plant Pathology. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102016>
- Tiwari, T., Robertson, C., El-Mohtar, C., *et al.* (2024). Genetic and physiological characteristics of CsNPR3 edited citrus and their impact on HLB tolerance. Frontiers in Genome Editing, 6. <https://doi.org/10.3389/fgeed.2024.1485529>
- USDA-APHIS (2023). Huanglongbing Disease Management. <https://www.aphis.usda.gov/aphis/resources/pests-diseases/hungry-pests/the-threat/huanglongbing/huanglongbing>
- Valdés, R., Ortiz, J., Beache, M., *et al.* (2016). A review of techniques for detecting Huanglongbing (greening) in citrus. Canadian Journal of Microbiology, 62, 803-811. <https://doi.org/10.1139/cjm-2016-0022>
- Villar-Luna, H., Santos-Cervantes, M., Rodríguez-Negrete, E., *et al.* (2024). Economic and Social Impact of Huanglongbing on the Mexico Citrus Industry: A Review and Future Perspectives. Horticulturae. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10050481>
- Wang, N., Trivedi, P. (2013). Citrus huanglongbing: a newly relevant disease presents unprecedented challenges. Phytopathology, 103 7, 652-65. <https://doi.org/10.1094/phyto-12-12-0331-rvw>
- Wenxiu M., Pang, Z., Huang, X., *et al.* (2022). Citrus Huanglongbing is a pathogen-triggered immune disease that can be mitigated with antioxidants and gibberellin. Nature Communications, 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28189-9>
- Xu, Q., Bai, J., *et al.* (2023). Identification of multiple symptoms of Huanglongbing (HLB) by electronic nose based on the variability of volatile organic compounds (VOCs). Annals of Applied Biology. <https://doi.org/10.1111/aab.12845>
- Yang, D., Wang, F., Hu, Y., *et al.* (2021). Citrus Huanglongbing Detection Based on Multi-Modal Feature Fusion Learning. Frontiers in Plant Science, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.809506>
- Yang, K., Hu, B., Zhang, W., *et al.* (2024). Recent progress in the understanding of Citrus Huanglongbing: from the perspective of pathogen and citrus host. Molecular Breeding 44: 77. <https://doi.org/10.1007/s11032-024-01517-1>
- Ye, N., Mai, W., Qin, F., *et al.* (2025). Early detection of Citrus Huanglongbing by UAV remote sensing based on MGA-UNet. Frontiers in Plant Science, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1503645>
- Yin, H., Wan, J., Zhang, S., *et al.*, (2025). Unveiling Prophage Diversity and Host Interactions in *Liberibacter*: Genomic Insights for Phage Therapy Against Citrus Huanglongbing. Biology 14, 576. <https://doi.org/10.3390/biology14050576>
- Younas, M., Zheng, Z., Atiq, M., *et al.* (2025). Insights into the Huanglongbing pandemic focusing on transmission biology, virulence factors and multifaceted management strategies. Pest Management Science. <https://doi.org/10.1002/ps.70073>

Zhang, Y., Hu, C., Yin, Y., et al. (2024). CRISPR/Cas12a-Responsive Smart DNA Hydrogel for Sensitive Electrochemiluminescence Detection of the Huanglongbing Outer Membrane Protein Gene. *Analytical Chemistry*.

<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c02489>

Zheng D., Armstrong C.M., Yao W., Wu B., Luo W., Powell C., Hunter W., Luo F., Gabriel D., Duan Y. (2024). Towards the completion of Koch's postulates for the citrus huanglongbing bacterium, *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Horticulture Research* 11: uhae011. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae011>

Zhao, P., Yang, H., Sun, Y., et al. (2025). Targeted MYC2 stabilization confers citrus Huanglongbing resistance. *Science*, 388 6743, 191-198. <https://doi.org/10.1126/science.adq7203>

Zhou, C. (2020). The status of citrus Huanglongbing in China. *Tropical Plant Pathology*, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00363-8>

Zhou, C. (2020). The status of citrus Huanglongbing in China. *Tropical Plant Pathology*, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00363-8>

Zhou, Y., Li, X., Guo, Z., et al. (2025). Chitosan Nanoparticles Encapsulate Antimicrobial Peptides for the Prevention and Control of Citrus *reticulata* Huanglongbing and Their Distribution in Plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c01419>

Zou, X., Jiang, X., Xu, L., et al. (2017). Transgenic citrus expressing synthesized cecropin B genes in the phloem exhibits decreased susceptibility to Huanglongbing. *Plant Molecular Biology*, 93, 341-353. <https://doi.org/10.1007/s11103-016-0565-5>

Zou, X., Zhao, K., Liu, Y., et al. (2021). Overexpression of Salicylic Acid Carboxyl Methyltransferase (CsSAMT1) Enhances Tolerance to Huanglongbing Disease in Wanjincheng Orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). *International Journal of Molecular Sciences*, 22. <https://doi.org/10.3390/ijms22062803>

Cita:

Ascencio, F., & Gómez-Anduro, G. (2026). Huanglongbing (HLB): Retos y Soluciones en la Citricultura Moderna. *Biotechnológica Magazine*, 4(1), 35-48. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19075152>

Pies de loto

Arturo Sánchez-Paz

Laboratorio de Virología. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Calle Hermosa 101, Col. Los Ángeles. Hermosillo, Sonora, México. CP. 83106.

Foto: Solstock

No seamos cándidos al suponer que el empoderamiento de las mujeres es una solución milagrosa que resolverá los problemas del mundo; mejor entendamos que darles el lugar que merecen es lo justo y que ofrece una serie de recompensas para la sociedad que van mucho más allá de la simple justicia.

Sin duda alguna, una de las obras más reconocidas y fundamentales del Dr. Arjun Appadurai es *“La modernidad desbordada: Dimensiones culturales de la globalización”*, publicada por primera vez en 1996. En este libro se analiza la forma en la que la migración masiva y los medios electrónicos, junto con los flujos de tecnología, finanzas e ideología, crean nuevas formas de comunidad y disyunciones culturales, y son impulsores relevantes de la modernidad que han transformado la vida cotidiana actual. Dejando de lado la provocadora idea de que la globalización ha transformado el concepto tradicional de modernidad, al inicio del libro, en el apartado *“Aquí y ahora”*, el Dr. Appadurai menciona que *“Uno de los legados más problemáticos de las grandes teorías de las ciencias sociales de Occidente... es que constantemente*

han reforzado la idea de la existencia de un momento muy preciso... que genera un quiebre profundamente dramático y sin precedentes entre el pasado y el presente”, y corona esta idea al mencionar que *“...sin embargo, es cierto: el mundo en el que vivimos hoy -en el cual la modernidad está decididamente desbordada, con irregular conciencia de sí y es vivida en forma dispareja- supone, por supuesto, un quiebre general con todo tipo de pasado”*. La modernidad, según el Dr. Bolívar Echeverría, implica sustituir lo tradicional por innovaciones que superan las limitaciones de las estructuras arraigadas y obsoletas. No obstante, Echeverría puntualiza que, precisamente por su carácter transformador, la modernidad es un *“proyecto inacabado, siempre incompleto”*.



Foto: Umbreen

China, a diferencia de otras civilizaciones antiguas, cuenta con un registro histórico documentado que describe los sucesos ocurridos a lo largo de varias dinastías sucesivas y comprende un periodo de cerca de 3,000 años. Es precisamente a través de este registro que se sabe que, hasta mediados del siglo XX, China estaba sumergida en una profunda persistencia secular de tradiciones, estructuras sociales y prácticas agrícolas. La época que abarca el periodo desde el fin oficial de la larga dinastía Qing (1911) hasta finales del turbulento periodo republicano (1949) se caracterizó por una economía agraria de tipo feudal, una ideología basada en las doctrinas del confucianismo y la falta generalizada de infraestructura moderna. Al comparar con lo que ocurría en Occidente, donde, tras la Segunda Guerra Mundial, se experimentaba un proceso de industrialización acelerada que transformaba su economía y sociedad, China parecía *“estancada en la antigüedad”*.

Si bien su origen es incierto, durante varios siglos las niñas en China eran sometidas a un procedimiento extremadamente cruel, doloroso y debilitante llamado *“vendaje de pies”*. Por lo general, cuando las niñas

alcanzaban entre los cuatro y los ocho años de edad, la madre vendaba sus pies de forma que todos los dedos, excepto el primero (popularmente conocido como el dedo gordo), se doblaran hacia la planta del pie, de modo que incrementaba la altura del arco y reducía el tamaño del pie. La planta y el talón se apretaban lo más posible. Tras años de dolor extremo, los pies finalmente se entumecían y, para mantenerlos pequeños, las mujeres continuaban usando la venda durante el resto de sus vidas. Los pies femeninos adultos ideales, diminutos y deformes, se conocían como *“pies de loto”*.

Además de ser objeto de culto erótico y una característica que definía la belleza femenina, los *“pies de loto”* eran un símbolo de estatus social. Si bien la costumbre de vender los pies comenzó entre las clases altas, poco a poco se extendió a todos los estratos sociales. Inicialmente, dado que esta práctica inhabilitaba a las niñas y mujeres, pues no podían caminar bien ni mantenerse de pie por periodos prolongados, solo las familias acaudaladas podían darse el *“lujo”* de tener hijas con *“pies de loto”*. Sin embargo, algunas familias de agricultores apostaban a *“sacrificar”* las ventajas que representaba contar con la mano de obra

de una hija y preferían vendar los pies de la hija mayor con la esperanza de que esto les ayudaría a conquistar maridos de familias pudientes. Por otro lado, los “pies de loto” hacían que las mujeres dependieran fuertemente de sus familias, especialmente de los hombres, pues se veían muy limitadas en sus hogares. Por lo tanto, esta práctica garantizaba que las mujeres estuvieran sometidas plenamente a los deseos y órdenes de sus maridos.

Cuando el 1 de octubre de 1949, el controversial líder del Partido Comunista de China, *Mao Zedong*, anunció la fundación de la República Popular Comunista de China en la Plaza de Tiananmén, prometió, con toda seriedad, una transformación completa de la sociedad china. Mao ofreció transformar la China tradicionalmente agrícola, una nación anticuada cuyos avances se habían frenado por una sociedad obsoleta, en una nación industrial y moderna, lo que implicó un profundo cambio del enfoque en la educación y la cultura. Quizá porque su madre, una mujer amable, generosa y de naturaleza abnegada, había sufrido la crueldad del vendaje de pies, quizá porque auténticamente consideraba esta práctica como un claro símbolo de retraso y opresión a las mujeres, o quizá debido a que los “*pies de loto*” significaban una reducción de una porción importante de la fuerza trabajadora con la que planeaba impulsar la productividad y alcanzar la modernidad, Mao prohibió el vendaje de pies en todo el país. A través de un poderoso despliegue retórico durante el desarrollo de su Revolución Cultural, el líder chino afirmó que “*las mujeres sostienen la mitad del cielo*” con el claro propósito de promover la igualdad de géneros. De hecho, la República Popular China incorporó desde el principio la igualdad de género en su constitución.

El mandato de Mao se caracterizó por convertirse en una dictadura totalitaria que, si bien unificó China y promovió un sistema educativo más amplio que

benefició a la mayoría de la población, también provocó un inmenso sufrimiento humano, violaciones sistemáticas de los derechos humanos y fracasos políticos catastróficos. Entre ellos, desafortunadamente, Mao no logró alcanzar la tan anhelada igualdad entre mujeres y hombres. Sin embargo, los cambios progresivos que ocurrieron a partir del gobierno de Mao lograron desgastar lentamente las anquilosadas desigualdades de género.

Han transcurrido casi 75 años desde el inicio de la transformación de China y ahora, igual que entonces, y a pesar de una persistente, larga e intensa lucha por lograr una distribución justa de oportunidades, recursos y responsabilidades, no se ha alcanzado la plena igualdad de género y las condiciones laborales de las mujeres a nivel global aún distan mucho de las de los hombres debido a obstáculos estructurales y fundamentales, como la violencia de género, la brecha salarial y los estereotipos, para alcanzar la igualdad de género.

Parece obvio decir que la investigación científica es una actividad humana, realizada por una enorme y creciente comunidad de personas. Existe una opinión generalizada en la sociedad civil de que los científicos suelen adherirse a altos estándares éticos y que el espíritu ético específico de la ciencia consiste en contribuir a mejorar la humanidad. Sin embargo, lo que no parece obvio para el público en general es que la ciencia es una actividad realizada por seres humanos con las mismas pasiones, intereses y prejuicios que afligen a quienes efectúan otras actividades. Los científicos no son inmunes a prejuicios como el racismo, el sexismo y la discriminación de género. Así, es innegable que las mujeres científicas sufren, a nivel mundial, discriminación de género. Este obstáculo perjudicial y persistente provoca que las científicas se enfrenten a

barreras sistémicas en la contratación, la exclusión de puestos de liderazgo, el acceso a subvenciones de menor cuantía para financiar sus investigaciones y el menosprecio de sus éxitos por parte de sus pares masculinos.

Los números no mienten. Diversos estudios destacan esta penosa realidad. Según el Informe de la UNESCO sobre la ciencia (la carrera contrarreloj por un desarrollo más inteligente), solo uno de cada tres investigadores es mujer (33 %). En México, según datos de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del 2024, a pesar de que las mujeres representaron el **57.4 %** de la matrícula de posgrado a nivel nacional, solo constituyen el **40.4 %** del padrón del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII). Si bien esa brecha ha disminuido (en 1984 la diferencia entre la participación de hombres y mujeres en el SNII era de **64 %**), aún está lejos de una participación igualitaria. Por supuesto, vale mencionar que estas diferencias no son exclusivas de México. Ocurren en todo el mundo. En Estados Unidos, por ejemplo, en 2025 las mujeres representaron solamente el **19 %** de los miembros de las distintas academias de ciencias.

Los obstáculos que enfrentan las mujeres en la academia pueden ser sutiles, pero son sumamente perversos. Así, un estudio publicado recientemente por el Dr. David Álvarez Ponce y colaboradores, demuestra que el promedio de tiempo para la revisión de un manuscrito sometido para su publicación por una *autora principal* requirió **7 días** más (**7.4 %**) que los requeridos para revisar un manuscrito sometido por un autor principal; **13 días** más (12.7 %) para los manuscritos sometidos con una *autora correspondiente* que los sometidos con un autor correspondiente; **15 días** más (**14.6 %**) para los manuscritos sometidos con una *autora principal* y una *autora correspondiente* que los sometidos con un autor principal y un autor correspondiente; y **9 días** más (**10.0 %**) para los manuscritos sometidos por *equipos formados exclusivamente por mujeres* que para los sometidos por equipos formados exclusivamente por hombres. ¿Mera coincidencia? No, es claro que existe un sesgo.



Otro estudio, publicado en 2025 por el Dr. Josep Maria Argilés-Bosch, lo confirma. Según Argilés-Bosch, cuando el género de los editores y de los autores correspondientes difiere, se produce un aumento significativo en el tiempo de aceptación de un manuscrito para su publicación. En contraste, cuando el género de los editores y de los autores correspondientes coincide, los tiempos de aceptación son significativamente menores. Llama la atención que cuando el editor es hombre y el artículo es sometido por una autora correspondiente, esta tendencia se agrava. Por otro lado, cuando la combinación en el proceso editorial implica la interacción entre editora y autor, la tendencia resulta menos clara. Aún más, en 2025, un estudio publicado por el Dr. Manuel Goyanes reveló que cuando se considera el total de académicos más citados en todas las disciplinas a nivel mundial, las mujeres están significativamente menos representadas (0.255 mujeres por cada hombre). Es decir, **por cada cuatro autores** de los más citados a nivel mundial, **solo se cita a una de las mujeres más citadas**. En ese mismo estudio se menciona que, salvo en Sudamérica, **los artículos publicados por mujeres reciben menos citas y presentan índices h** (una métrica bibliométrica que evalúa simultáneamente la productividad y el impacto de la producción científica de un investigador) **más bajos** que los de los artículos publicados por hombres.

Se han sugerido diferentes explicaciones para ello. Como si se pretendiera ocultar la realidad. Pero los hechos hablan por sí mismos. Es innegable que existe una brecha de género en la ciencia a nivel mundial. Y aunque ha habido avances para disminuir esta brecha, aún falta mucho por hacer. Los logros alcanzados pueden ser las semillas del cambio para erradicar la desigualdad de género. Aunque sea triste pensarlo, las científicas actuales, con su esfuerzo, perseverancia e

inteligencia, han creado un entorno más fértil para que las semillas de la igualdad germinen, para que en un futuro cercano se coseche el fruto de la *"igualdad de género"* plena, para que las científicas sean efectivamente la otra mitad del cielo, no una porción menor.

Referencias

- Álvarez-Ponce, D., Batz, G., y Ramírez Torres, L. (2026). Biomedical and life science articles by female researchers spend longer under review. PLOS Biology 24(1), e3003574. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3003574>.
- Argilés-Bosch, J.M., Kasperskaya, Y., García-Blandón, J., y Ravenda, D. (2025). The interplay of author and editor gender in acceptance delays: evidence from accounting journals. Scientometrics, 130, 1939-1965. <https://doi.org/10.1007/s11192-025-05259-5>
- Appadurai, A. (1996). Modernity at large: Cultural dimensions of globalization. University of Minnesota Press: Minneapolis, MN, USA. <https://www.upress.umn.edu/9780816627936/modernity-at-large/>.
- Berger, E., Yang, L., y Ye, W. (2019). Foot binding in a Ming dynasty cemetery near Xi'an, China. International Journal of Paleopathology, 24, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.ijpp.2018.09.005>.
- Echeverría, B. (2009). ¿Qué es la modernidad? Cuadernos del Seminario. Modernidad: Versiones y dimensiones. No. 1. UNAM. México. <https://www.seminariomodernidad.unam.mx/index.php/blog/cuadernos-del-seminario>.
- Goyanes, M., Domínguez-Díaz, A., Jordá, B., y de-Marcos, L. (2025). Gender gap in citations, h-index, and representation: Examining the highly cited authors across continents and disciplines in Google Scholar. PLoS One. 20(11), e0334690. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334690>.

Sobre el autor



El Dr. Arturo Sánchez-Paz es investigador titular encargado del Laboratorio de Virología del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste en Hermosillo, Sonora, México. Su investigación ha generado más de 50 artículos publicados en revistas científicas internacionales y ha guiado y dirigido tesis de varios estudiantes de licenciatura y posgrado. Es miembro del SNII (II) y de la Academia Mexicana de Ciencias.

Cita:

Sánchez Paz, A. (2026). Pies de Loto. Biotecnológica Magazine, 4(1), 49-54.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.19075257>

CHILTEPÍN DE TRASPATIO

Capsicum annuum var. glabriusculum

El chiltepín es un chile silvestre, pequeño y extremadamente picante. Considerado el “Oro Rojo”, forma parte esencial de la gastronomía y cultura del norte de México.

SOBREEXPLOTACIÓN



Sus poblaciones silvestres en el Noroeste están disminuyendo.

¿SEMBRAR EN TRASPATIO?



Reduce presión sobre poblaciones silvestres y conserva esta especie



Permite obtener frutos para consumo



Fortalece la cultura local y apoya prácticas sustentables

COMO SEMBRARLO

1 Selecciona frutos rojos, secar y extraer semillas

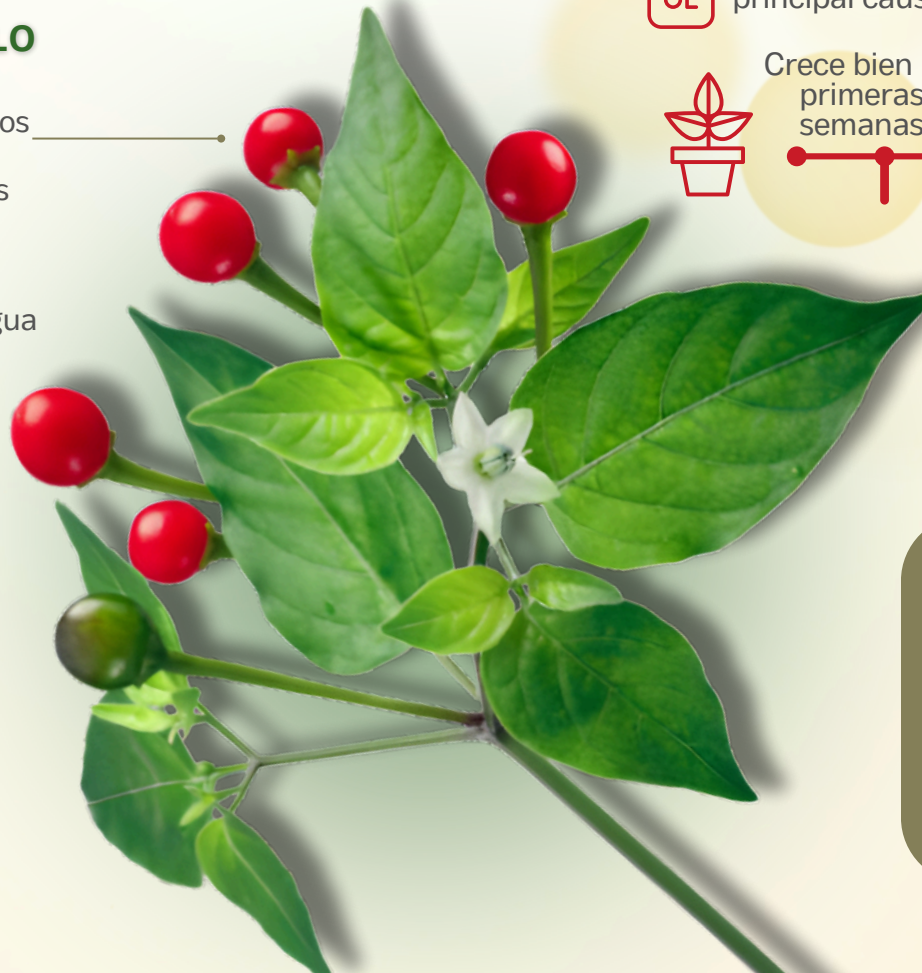
2 Descartar semillas que flotan en agua

3 A las no flotantes-Cloro diluido en agua (1:1) por 10 min

4 Enjuagar dos veces

5 Siembra en sustrato ó composta

6 Germina en ~10 días



AUTORES

Gracia Alicia Gómez Anduro (ggomez@cibnor.mx)
Saul Edel Briseño Ruiz
Daniela Núñez García
Carolina Sánchez Verdugo



¿POR QUÉ SE MUERE EL CHILTEPÍN EN CASA?



El cloro del agua la principal causa



Se acumula en las hojas



Crece bien las primeras semanas

Después de 6 meses



Muerte de la planta

¿CÓMO LO EVITAMOS?



Dejar reposar el agua 24-48 h al sol



Usar filtros de carbón activado

DATOS CURIOSOS

- Es un chile que apenas inicia domesticación.
- De 100 semillas silvestres, solo germinan 30.
- Tercer lugar en picor (superado por habanero y ghost pepper).
- Propiedades medicinales: sinusitis, congestión, analgésico y digestivo.

Referencias:

1. <https://goo.su/o2gBM>
2. <https://goo.su/V9zmb>
3. <https://goo.su/WJ63nI9>
4. <https://goo.su/PGurzmb>

