

Métodos de resiliencia vegetal: aliados biotecnológicos para incrementar la defensa de las plantas ante fitopatógenos

Plant resilience methods: biotechnological allies to increase plant defense against phytopathogens

Elizabeth Sánchez Jiménez¹, Rubén Antonio Olivares Terrones², Eduardo Valdés Velarde¹, Evangelina Esmeralda Quiñones-Aguilar², Gabriel Rincón Enríquez^{2*}

¹ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

² Laboratorio de Fitopatología, Unidad de Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ), Zapopan, Jalisco, México.

* Autor de correspondencia: grincon@ciatej.mx

Palabras clave:

biotecnología, elicitores, miARN, actinobacterias, bacteriófagos, micorrizas

Keywords:

biotechnology, elicitors, miRNAs, actinobacteria, bacteriophages, mycorrhiza

Resumen

La biotecnología aplicada al control de microorganismos fitopatógenos en plantas de interés agrícola tiene como objetivo aprovechar los sistemas naturales para fortalecer la respuesta de las plantas y métodos basados en microorganismos para suprimir enfermedades. En CIATEJ se han realizado estudios enfocados en el desarrollo de diferentes aplicaciones para el biocontrol de enfermedades de plantas, entre ellas, destaca la aplicación de fructanos y proteínas bacterianas como bioinductores (elicitores), que han demostrado generar efectos protectores sistémicos o locales, favoreciendo la defensa contra fitopatógenos. La incorporación de nuevas tecnologías basadas en microARN abre la posibilidad de regular la expresión genética de manera precisa, ofreciendo un enfoque innovador para desarrollar variedades resistentes a enfermedades. La aplicación de microorganismos capaces de inhibir el desarrollo de los fitopatógenos, mediante la producción de moléculas con actividad antimicrobiana, como las actinobacterias, o por la lisis de los patógenos, como los bacteriófagos para el control de enfermedades de plantas de interés agrícola.

Abstract

Biotechnology applied to the control of phytopathogenic microorganisms in agriculturally important plants aims to harness natural systems to strengthen plant responses, as well as methods based on microorganisms to suppress diseases. At CIATEJ, studies have been conducted focused on the development of different applications for biocontrol of plant diseases, among them, the application of fructans and bacterial proteins as bioinducers (elicitors), which have demonstrated protective effects at both systemic and local levels, enhancing defense against phytopathogens. The incorporation of new technologies based on microRNAs opens the possibility of precisely regulating gene expression, offering an innovative approach for the development of disease-resistant crops. Likewise, the application of microorganisms capable of inhibiting the development of phytopathogens through the production of antimicrobial molecules, such as actinobacteria, or through pathogen lysis, such as bacteriophages, provides effective strategies for the control of diseases in agriculturally important plants.

Recibido: 17 de mayo 2026
Revisado: 01 de julio 2026
Aceptado: 03 de julio 2026
Publicado: 01 de agosto 2026



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

Introducción

La población mundial en crecimiento demanda una mayor producción de alimentos que, a su vez, sea más efectiva y ambientalmente responsable; sin embargo, la seguridad alimentaria depende de diferentes factores: el aumento en la incidencia de enfermedades fitopatógenas derivadas de las condiciones climáticas cambiantes (Das et al., 2023; Verma et al., 2025). La biotecnología es la herramienta más prometedora para la producción sostenible de alimentos, con la finalidad de mejorar procesos en la industria, mejorar la producción alimenticia, ofrecer alternativas en medicina o para la defensa vegetal frente a fitopatógenos, entre otras aplicaciones (Hernández-Fonseca, 2010).

La biotecnología suele generar incertidumbre debido a que ha sido asociada con el desarrollo de organismos genéticamente modificados, mejor conocidos como transgénicos, pero involucra más procesos capaces de modificar el comportamiento de un organismo sin necesidad de realizar modificaciones genéticas (Jiménez-Villota & Insuasti, 2025). Esto permite crear estrategias de mejora, fomentando la utilización de los mecanismos ya existentes dentro de la célula, del tejido, de órganos o incluso del organismo completo. Las técnicas que aprovechan los procesos naturales para fortalecer el sistema mismo, sin generar modificaciones al genoma, son algunas de las herramientas más prometedoras (Singh et al., 2019; Kumar & Mukhopadhyay, 2025).

Dentro de los aliados de la biotecnología para la protección vegetal frente a fitopatógenos se han descrito dos estrategias generales para el control de enfermedades fitopatógenas: las directas e indirectas. Las estrategias directas tienen efecto sobre el organismo patógeno, mientras que las indirectas disminuyen el efecto de los microorganismos fitopatógenos. Por ejemplo, los inductores o elicitores, que son moléculas o señales de origen biótico o abiótico que inducen en la planta respuestas de defensa, activando mecanismos de resistencia frente a patógenos o estrés (Thakur et al., 2013). Los microARN (miRNA) son pequeños ARN no codificantes que regulan la expresión génica a nivel postranscripcional mediante el reconocimiento específico de ARN mensajeros blancos, modulando procesos esenciales del desarrollo y la respuesta al estrés en plantas (Bojórquez-Orozco et al., 2023). Se trata de moléculas con diferente naturaleza, que actúan a nivel celular y sistémico, es decir, la respuesta generada se observa en el organismo completo (Gowthami, 2018; Sánchez-Jiménez et al., 2025). Por otro lado, las estrategias de control directas son aquellas donde se inhibe el desarrollo del fitopatógeno para evitar la enfermedad (O'Brien & Phillip, 2017). Estos son mecanismos como la producción de moléculas con actividad antimicrobiana o directamente la infección y destrucción del patógeno, como en el caso de los virus bacterianos (bacteriófagos).

En el 2008 inicia la línea de investigación en Fitopatología en el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ). En este artículo se recopilan algunos de los trabajos publicados producto de esta línea de investigación que han permitido el desarrollo de alternativas de control biológico de microorganismos fitopatógenos, que contribuyen a disminuir el impacto ambiental y que conllevan el manejo sustentable de bajo impacto ambiental de enfermedades de importancia agrícola.

“Vacunas vegetales”: aplicación de inductores (elicitores)

Las plantas son susceptibles al cambio climático, viéndose afectadas en diferentes etapas de desarrollo, como la germinación, la floración y la productividad, manteniéndose en un estrés constante por el cambio y el aumento de las condiciones climáticas extremas. El estrés abiótico es un factor determinante para su estabilidad, pero, como organismos productores primarios, capaces de producir su propio alimento, son la base de la mayoría de la cadena alimentaria, siendo blancos de invasión por hongos, bacterias, virus, nematodos y animales (Abdul-Malik et al., 2020; Kumar & Mukhopadhyay, 2025).

Los inductores o elicitores son moléculas de naturaleza química, polimérica o biológica que facilitan el reconocimiento entre plantas y fitopatógenos (Gowthami, 2018; Sánchez-Jiménez et al., 2025). Estas moléculas pueden activar el sistema de defensa en las plantas y fortalecer su resistencia a patógenos de manera similar al efecto de vacunas aplicadas a animales con un sistema inmunológico, como en el caso de los seres humanos (Cuellar-Espejel et al., 2024; 2025); por lo cual se les ha denominado “vacunas vegetales”. Estas moléculas, provenientes de derivados naturales, pueden inducir respuestas favorables frente a un amplio espectro de patógenos, sin importar la interacción planta-patógeno. Además, han demostrado mejorar la capacidad de respuesta y protección de la planta, lo que, sin necesidad de modificar su genoma, favorece la respuesta eficaz contra fitopatógenos principalmente al fortalecer sus tejidos (López-Velázquez et al., 2019; Abdul Malik et al., 2020; López-Velázquez et al., 2023a, b).

Investigaciones realizadas en el CIATEJ han explorado el uso de fructanos y proteínas como elicitores en la agricultura; destacando López-Velázquez et al. (2023a), quienes demostraron que la aplicación de inulina de dalia de alta pureza incrementó la actividad de β -1,3-glucanasa y peroxidasas, especialmente a una concentración de 300 mM. Esta respuesta se manifiesta tanto en el sitio de aplicación (local) como sistemáticamente (toda la planta) (Figura 1A). Esta aplicación redujo la severidad de la marchitez del chile causada por *Phytophthora capsici* hasta un 50%; sin embargo,

esta estrategia elevó los costos de producción, motivando el análisis de fructanos de distintos orígenes. Por otra parte, los fructanos de *Agave*, derivados de procesos de producción secundaria, también demostraron su potencial elicitor; el trabajo realizado por Sánchez-Jiménez et al. (2025) consistió en utilizar tres tipos de fructanos, uno de calidad alimentaria de *Agave tequilana* Weber var. Azul y otro obtenido por extracción semiartesanal de *Agave cupreata*, evaluándose de manera comparativa con inulina de dalia. La eficacia de su respuesta de defensa contra *Phytophthora capsici* en la infección de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) se analizó evaluando los mecanismos de defensa, incluidos la deposición de lignina y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), la acumulación y actividad de β -1,3-glucanasa y peroxidasa. Los resultados indicaron que la aplicación foliar de ambos fructanos mostró protección contra la infección, reduciendo la incidencia y gravedad de la enfermedad de hasta el 50%, donde los fructanos derivados de *A. tequilana* en una concentración de 0.5 g/L favorecen la mayor protección, donde se asocian con la acumulación temprana de H_2O_2 y el aumento en la actividad de la peroxidasa, lo que se relaciona con la dinámica de las especies reactivas de oxígeno (ROS) diferenciadas de las plantas sin tratamiento, las cuales tienen una menor acumulación (Figura 1B).

Otro compuesto de origen fúngico capaz de inducir la respuesta de defensa de las plantas es el quitosano, un polímero natural con propiedades biológicas que le atribuyen diferentes ventajas, entre ellas que es biodegradable, biocompatible, seguro, económico y no tóxico. López-Velázquez et al. (2023b) utilizaron quitosano de bajo peso molecular, grado alimenticio, grado práctico y grado medio en concentraciones de 0.01 y 0.05% para evaluar su efecto protector contra la roya del café. Los resultados demostraron que el quitosano de grado práctico y el quitosano grado alimenticio indujeron la actividad enzimática de β -1,3-glucanasas y peroxidasas. Se observó un aumento en la cantidad de compuestos fenólicos en plantas tratadas con quitosano de alto peso molecular al 0.05% con un aumento de hasta un 20% en la cantidad de compuestos fenólicos en plantas tratadas con quitosano, lo que se refleja en un aumento en la protección contra la roya del café, por la formación de β -1,3-glucanasas, que degradan la pared celular del hongo y el aumento en las peroxidasas, que se refleja como el engrosamiento de la pared celular de la planta, considerando al quitosano como una molécula eficaz para el control de la roya del café (Figura 1C).

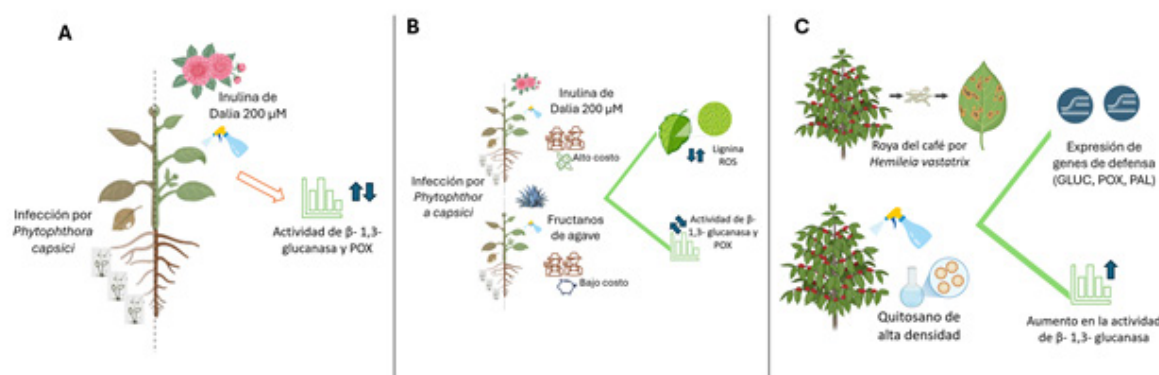


Figura 1. Metodologías utilizadas para la aplicación de elicitores frente a diferentes microorganismos fitopatógenos. A. Aplicación de inulina de dalia para la protección frente a *P. capsici* (López-Velázquez et al., 2023a). B. Aplicación de fructanos de agave para la protección frente a *P. capsici* (Sánchez-Jiménez et al., 2025). C. Aplicación de quitosano para la protección de café contra *Hemileia vastatrix* (López-Velázquez et al., 2023b)

Finalmente, las proteínas harpinas (Hrp) son proteínas de carácter ácido, termoestables, ricas en glicina y libres de cisteína, producidas por las bacterias Gram negativas que son excretadas por el sistema de secreción tipo III en los procesos de infección y las interacciones planta-patógeno (Cuéllar-Espejel et al., 2025). Estas proteínas son capaces de activar el sistema de defensa de las plantas, ya que son detectadas en el tejido superficial de las plantas y esto activa múltiples sistemas de defensa, como la Resistencia Sistémica Adquirida relacionada con el ácido salicílico, otras hormonas de defensa como el etileno, el jasmonato o el ácido abscísico u otros sistemas de defensa como la producción de especies reactivas de oxígeno o la activación de MAP quinasas (Patoliya et al., 2026). Esta estrategia ha sido explorada en el área de Fitopatología en el CIATEJ, principalmente para el control de la mancha bacteriana de los cultivos de chile y jitomate (Cuéllar-Espejel et al., 2025). Para esto se estimuló a la bacteria *Xanthomonas* sp., agente causal de la enfermedad, para incrementar la producción de las proteínas Hrp, las cuales, posteriormente, fueron purificadas y aplicadas en plantas sanas (Valerio-Landa et al., 2020; 2021). Los resultados mostraron que la aplicación de las proteínas a bajas concentraciones (0.01 µg/mL) redujo hasta en un 60% la aparición de síntomas de la mancha bacteriana causada por *Xanthomonas* en el chile, pero también las protegió contra la enfermedad de la peca bacteriana causada por *Pseudomonas syringae* al reducir hasta en un 53% el número de manchas (Cuéllar-Espejel et al., 2025).

La aplicación de elicitores de diversos orígenes ha demostrado un efecto protector al activar rutas enzimáticas que favorecen la respuesta temprana frente a fitopatógenos, con resultados exitosos en chile, jitomate y café. Diferentes estudios han permitido identificar las rutas enzimáticas diferenciadas que desencadenan respuestas

eficientes, integrando disciplinas como la economía circular, con el aprovechamiento de recursos derivados, como los fructanos de *Agave* de diferentes orígenes, el uso de tejido de chile de desecho al finalizar el ciclo del cultivo como inductor de proteínas Hrp; la ciencia de materiales, mediante la caracterización fisicoquímica de compuestos como el quitosano y los fructanos de *Agave* (López-Velázquez et al. 2023 A, B; Sánchez-Jiménez et al., 2025) y el empleo de proteínas Hrp (Valerio-Landa et al., 2020; 2023). Este proceso de interacción elicitor-planta-patógeno abre nuevas perspectivas para la protección vegetal sostenible.

Elicitores vivos: Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA)

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son microorganismos que establecen relaciones simbióticas de beneficio mutuo con las raíces de las plantas y ayudan a aumentar la adquisición de nutrientes por parte de las plantas y les confieren resistencia a factores de estrés (Minchev et al., 2026). Esta relación simbiótica también tiene la capacidad de inducir mayor resistencia a las enfermedades mediante mecanismos similares a los de otros elicitores, mediante la activación de rutas hormonales como las del jasmonato y la del etileno. Las plantas micorrizadas presentan cambios fisiológicos que mejoran la respuesta a fitopatógenos, como la acumulación de metabolitos —como los flavonoides y antocianinas— y también presentan una respuesta más rápida a las señales de daño. Además, los HMA pueden competir con los fitopatógenos del suelo —como hongos, oomicetos y nematodos— por la colonización de las raíces. A todos estos mecanismos en conjunto se les conoce como Resistencia Inducida por Micorrizas (André y Chave, 2026; Minchev et al., 2026).

El uso de hongos micorrízicos arbusculares como una estrategia biológica para el control del oomiceto fitopatógeno *Phytophthora capsici*, causante de la marchitez del chile. Los estudios realizados demostraron que la inoculación de plantas de *Capsicum annuum* con consorcios micorrízicos no solo favorece el crecimiento vegetal, incrementando la altura de planta, el diámetro del tallo, el número de hojas y la biomasa, sino que también reduce la severidad de la enfermedad. En particular, el consorcio micorrízico denominado Cerro del Metate mostró un importante efecto bioprotector, disminuyendo los daños ocasionados por el patógeno en variedades de chile serrano y poblano, llegando a duplicar la altura de las plantas micorrizadas en la variedad de chile serrano y disminuyendo la severidad de la infección por *Phytophthora capsici* hasta en un 80% (Reyes-Tena et al., 2016). Además, investigaciones posteriores indicaron que la combinación de micorrizas con actinobacterias puede potenciar estos efectos. En el trabajo de Reyes-Tena et al. (2017) se observó que *P. capsici* infectó hasta el 70% de la raíz de plantas de chile sin protección, disminuyendo

a solo 33% cuando se inocularon con el HMA, y a solo 12% cuando se inoculó en conjunto con HMA y una cepa de actinobacteria, aprovechando las capacidades de biocontrol de esta última.

Regulando amenazas: miARN aliado de la biotecnología vegetal

Los miARN (microARN) son pequeñas moléculas de ARN no codificantes que surgen de manera natural en un proceso altamente regulado durante la transcripción del ADN; estos son secuencias de ARN monocatenarios que no son codificantes de proteínas y surgen a partir de la formación de horquillas. Los microARN pueden transcribirse a partir del ADN genómico en el núcleo a través de la ARN polimerasa II donde surge un pre-miARN, posteriormente una ribonucleasa III enciende estos precursores y se une a una proteína para transportar estas secuencias al citoplasma y es aquí donde mediante proteínas transportadoras puede unirse a diferentes complejos e inducir la degradación o suspensión de la traducción del ARNm (Bórrquez-Orozco et al., 2023; Genedy et al., 2022).

Se llegó a considerar que los miARN eran un residuo del proceso de transcripción, sin función propia, pero en la actualidad se sabe que son pequeñas moléculas con amplia capacidad y funcionalidad, ya que se involucran en la expresión de genes; estas moléculas funcionan como “interruptores moleculares” dentro de las células. Su objetivo es regular qué genes se activan y cuáles se apagan (Zhang et al., 2022). El descubrimiento de estas moléculas ha demostrado que con una secuencia corta (19-25 nucleótidos) se pueden regular funciones específicas. ¿De qué forma? Adhiriéndose a la secuencia del ARNm de un gen de interés (gen en proceso de expresión), provocando que sea degradada o que no se permita su lectura y, por lo tanto, no ocurra la traducción. Esto puede interferir en el desarrollo, la diferenciación celular, las respuestas al estrés y la homeostasis. Pequeñas moléculas de ARN son tan relevantes que su descubrimiento mereció el Premio Nobel de Medicina en 2024 a Victor Ambros y Gary Ruvkun; aunque este proceso se describió por primera vez en las células animales, en los vegetales y demás organismos está presente una herramienta biotecnológica para regular la expresión de sus genes (O’Brien et al., 2018; Tang et al., 2021).

En las plantas, algunos miARN pueden silenciar genes relacionados con el estrés biótico y abiótico, que favorecen la infección de fitopatógenos, convirtiéndose en una defensa molecular no invasiva. Su función dentro de la célula define la expresión específica de genes, sin necesidad de recurrir al genoma original, simplemente eliminando secuencias antes de su expresión en su forma funcional de proteínas (Tang et al., 2021).

El ARN es conocido por ser una molécula que se degrada fácilmente; sin embargo, se sabe que los microARN son muy resistentes, con el tamaño perfecto para transportarse por la célula, llegar a células aledañas y generar efectos de regulación genética (Jiang et al., 2023). Se sabe que los miARN son tan funcionales que incluso se comparte interespecie, es decir, que un hongo puede transferir un miARN funcional a células vegetales, o que células vegetales pueden transferir miARN funcional a células humanas. Estos miARN funcionan porque tienen una estructura tan pequeña que suele no considerarse un peligro dentro del sistema de replicación celular; al ser tan pequeños, pasan desapercibidos, pero su función está definida, es altamente específica y eficiente (Lv et al., 2023).

En agricultura, los miARN han sido empleados para desarrollar variedades con mayor resistencia a condiciones bióticas y abióticas, por ejemplo, en maíz se ha favorecido la resistencia al estrés hídrico; en trigo, a enfermedades causadas por hongos como la roya y la fusariosis; mientras que en tomate se ha favorecido la resistencia a virus (Chaudhary et al., 2018; Lv et al., 2023).

Las investigaciones actuales han demostrado que los miARN desempeñan un papel importante en la regulación genética que favorece la protección ante diferentes factores, como la resistencia a enfermedades en trigo. La mayoría de los estudios se enfocan en describir la diferenciación y sobreexpresión de miARN en diferentes procesos biológicos, dilucidando que su aplicación es efectiva; se transporta eficientemente aun si la aplicación es exógena, donde ocurre una compatibilidad aunque el miARN sea externo y pueda interferir en funciones fisiológicas (Jiang et al., 2023; Lv et al., 2023).

El enemigo de mi enemigo es mi amigo: el control biológico

El término de control biológico se refiere a una amplia variedad de métodos de control de plagas y enfermedades en la agricultura excluyendo el uso de agentes químicos y culturales (Barrera, 2021; Waage & Greathead, 1988) y se puede definir como el uso de organismos biológicos, sus partes o derivados, como agentes para el control de plagas y enfermedades. El control biológico, por tanto, es un fenómeno que debe ser entendido como un proceso agroecológico, donde intervienen factores bióticos y abióticos y la acción del humano está encaminada a regular las poblaciones de las plagas o microorganismos fitopatógenos para mantenerlas por debajo del umbral de daño económico (Rodríguez-del-Bosque, 2019). Específicamente, el control de enfermedades de plantas es la supresión de una enfermedad causada por un microorganismo fitopatógeno por la aplicación de un agente de control biológico, como un hongo, una bacteria o un virus (O'Brien & Phillip, 2017).

Los mecanismos de control biológico de enfermedades de plantas pueden involucrar distintos procesos directos, como la supresión del desarrollo de los fitopatógenos; o indirectos, como la producción de compuestos que activan o potencian las respuestas de defensa de las plantas y la regulación del agroecosistema protegiendo y promoviendo a los enemigos naturales y competidores de los fitopatógenos (Köhl et al., 2019). Ya se ha hablado anteriormente de algunos de los mecanismos indirectos, como los elicitores, así que ahora se abordarán los mecanismos directos; primero, en la producción de metabolitos con actividad antimicrobiana, y enseguida, en los virus bacterianos, los cuales se conocen como bacteriófagos o simplemente fagos.

El arsenal metabólico de las actinobacterias

Los productos naturales, también llamados metabolitos secundarios o especializados, son moléculas producidas por un grupo limitado de organismos que les ayudan a interactuar con su medio ambiente. Aunque muchos microorganismos son capaces de sintetizar este tipo de compuestos, cada molécula en particular suele ser producida solo por especies o grupos muy específicos. Estas sustancias les permiten interactuar con su entorno y desempeñan funciones importantes en su adaptación y supervivencia (Hoskisson & Seipke, 2020). Los metabolitos con actividad antimicrobiana son de gran importancia para el control de fitopatógenos porque ofrecen una alternativa eficaz y más amigable con el ambiente frente a los pesticidas químicos. Las actinobacterias, en especial el género *Streptomyces*, son los mayores productores de estos compuestos, incluyendo la mitad de los antibióticos comerciales, así como productos con otras características de interés como enzimas, pigmentos, antioxidantes, antivirales, antitumorales o metabolitos reguladores del crecimiento vegetal, entre otras (Rincón-Enríquez et al., 2016).

Durante el ciclo de vida, las bacterias del género *Streptomyces* producen una amplia variedad de compuestos naturales, como antibióticos y otras moléculas bioactivas, que les permiten competir con hongos y bacterias dañinas en el suelo. Estas sustancias pueden inhibir el crecimiento de organismos que causan enfermedades en las plantas, ayudando a proteger a los cultivos agrícolas de manera natural. Además, al ser productos de origen biológico, suelen ser más específicos y menos persistentes en el ambiente, lo que reduce el impacto negativo sobre otros organismos y favorece una agricultura más sostenible (Rincón-Enríquez et al., 2016).

Las actinobacterias del género *Streptomyces* son bacterias Gram positivas filamentosas que se caracterizan por un ciclo de vida complejo que inicia con la germinación de una espora, que crece en forma de filamentos ramificados llamados micelio vegetativo bajo la superficie y que se encarga de absorber nutrientes. Cuando los

nutrientes empiezan a escasear, la bacteria entra en una segunda etapa: parte del micelio vegetativo se diferencia en micelio aéreo que se eleva sobre la superficie del sustrato. Finalmente, el micelio aéreo se divide de manera ordenada para producir largas cadenas de esporas, cada una capaz de iniciar un nuevo ciclo si las condiciones son adecuadas. Debido al proceso de diferenciación que tiene en este ciclo de vida, este grupo de bacterias presenta una gran adaptabilidad a una amplia diversidad de ambientes, incluyendo los suelos y las raíces. Por otra parte, el grupo de los *Streptomyces* se caracteriza por una extraordinaria diversidad metabólica que les permite sintetizar moléculas bioactivas como antibióticos, enzimas hidrolíticas y compuestos orgánicos volátiles con actividad antimicrobiana; por lo cual, este grupo microbiano tiene un gran potencial para el control biológico mediante la inhibición de bacterias fitopatógenas e inducción de resistencia sistémica en las plantas (Jahan et al., 2025).

En especial, las actinobacterias aisladas de suelos de México son una valiosa fuente natural de moléculas bioactivas debido a la enorme diversidad ambiental del país. Los suelos mexicanos incluyen ecosistemas muy variados que imponen condiciones ambientales extremas y cambiantes. Para adaptarse y competir en estos ambientes, las actinobacterias tienen que adaptarse y evolucionar. Esta combinación de alta biodiversidad del suelo y presión ecológica favorece la aparición de moléculas nuevas o poco exploradas (Evangelista-Martínez et al., 2017), entre las cuales se encuentran las moléculas con actividad antimicrobiana con potencial para el control de microorganismos fitopatógenos.

En CIATEJ se han realizado varios trabajos para explorar el potencial de las actinobacterias de distintos ambientes del país, para inhibir el desarrollo de algunos de los fitopatógenos de mayor impacto en la agricultura. Por ejemplo, Quiñones-Aguilar et al. (2024) aislaron, a partir de un suelo agrícola con cultivo de *Agave* spp. en el estado de Michoacán, tres cepas de *Streptomyces* spp. capaces de inhibir significativamente el desarrollo de *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*. Por su parte, en el trabajo de Rincón-Enríquez et al. (2014) se aislaron 80 cepas de actinobacterias de suelos agrícolas de Michoacán y Aguascalientes, de las cuales cinco mostraron la inhibición total del agente causal del tizón del halo de frijol (*P. syringae* pv. *phaseolicola*). Además, se ha evaluado la capacidad de las actinobacterias aisladas de suelos de distintas partes del país, como Jalisco y Michoacán, para inhibir *in vitro* a *Xanthomonas* spp., grupo de bacterias fitopatógenas que infectan más de 400 especies de plantas de interés agrícola (Trinidad-Cruz et al., 2026).

Las actinobacterias incluyen en su arsenal de productos naturales moléculas con actividad antifúngica y, por lo tanto, sus productos derivados, como extractos e inoculantes, tienen aplicaciones para el control de hongos fitopatógenos. En este

sentido, se ha evaluado el potencial de distintas cepas de actinobacterias del género *Streptomyces* aisladas de suelos en México para inhibir el desarrollo de omicetos u hongos fitopatógenos como *Phytophthora capsici*, *Fusarium oxysporum* y *Botrytis cinerea* (Evangelista-Martínez et al., 2017; Vargas-Gómez et al., 2023, 2025) que pueden afectar los cultivos de forma independiente o en consorcio, como el caso de la enfermedad del *Damping* causada por consorcios de *P. capsici*, *F. oxysporum* y *Rhizoctonia solani*, que causan grandes pérdidas económicas en cultivos tan variados como tomate, cítricos, mango o plátano (Evangelista-Martínez et al., 2020). Si bien no se han identificado los compuestos bioactivos en la mayoría de las cepas de actinobacterias, en el trabajo de Ríos-Muñiz y Evangelista-Martínez (2025) se identificó un método de acción potencial al observar que los extractos inhiben la formación de la membrana conidial. Aunque la mayoría de las cepas se han evaluado en condiciones *in vitro*, también se han usado distintas cepas de *Streptomyces* para el control de enfermedades postcosecha que disminuyen el tiempo de vida de anaquel de frutas y la calidad del producto final (Evangelista-Martínez et al., 2022).

Los virus bacterianos (bacteriófagos)

Los virus son entes biológicos que se encuentran cerca de la frontera entre la materia viva y la materia inerte, no se alimentan, no crecen, no se pueden desplazar por sí mismos y, en general, no interactúan con el ambiente para mantener un equilibrio (homeostasis), únicamente pueden reaccionar a las células que infectan, las cuales replican su material genético y producen las proteínas para ensamblar nuevos virus. En general, los virus consisten en un sistema que les permite reconocer un tipo especial de células, otro que les permite inyectar su material genético dentro de la célula que han reconocido y una o varias capas de proteínas que protegen el material genético (Keen, 2015).

Los virus que infectan a las bacterias se conocen con el nombre de bacteriófagos o fagos, los cuales se pueden utilizar como agentes de control biológico y, a pesar de su simplicidad, son abundantes y presentan una gran diversidad en la naturaleza. La fagoterapia es el uso de los bacteriófagos para controlar infecciones bacterianas (Gordillo-Altamirano & Barr, 2019). Se aprovecha de que, durante el ciclo de reproducción, la mayoría de los fagos destruyen las bacterias que infectan. Su ciclo de reproducción puede seguir dos vías: el ciclo lítico y el ciclo lisogénico. En el ciclo lítico, el fago se adhiere a la bacteria, inyecta su material genético y utiliza la maquinaria celular del hospedero para producir nuevas partículas virales. Al final de este proceso, la bacteria se rompe (lisa) y libera numerosos fagos capaces de infectar nuevas células bacterianas. En cambio, en el ciclo lisogénico, el ADN del fago se

integra al genoma de la bacteria sin destruirla de inmediato, permaneciendo latente hasta que condiciones ambientales favorecen su activación y el paso al ciclo lítico (Maurice et al., 2013). El empleo de bacteriófagos presenta ventajas, como que son altamente específicos, es decir, atacan únicamente a la bacteria patógena sin dañar a otros microorganismos benéficos, a las plantas, a los animales o a las personas y su uso contribuye a disminuir la dependencia de antibióticos y compuestos químicos, ayudando a enfrentar el problema de la resistencia bacteriana y a promover una agricultura más eficiente y ambientalmente responsable (Tripathi et al., 2024).

Se ha buscado generar soluciones para distintas enfermedades causadas por bacterias fitopatógenas. Uno de los ejemplos más completos es la generación de un producto formulado para el control de la mancha bacteriana del chile que mezcla dos fagos de *Xanthomonas euvesicatoria*, causal de la mancha bacteriana en solanáceas (Ibarra-Rivera et al., 2025). Ambos bacteriófagos, denominados XaF13 y XaF18, fueron aislados de suelos donde se cultiva chile, con presencia en Michoacán y Jalisco, y se han caracterizado a nivel microbiológico y genómico (Ríos-Sandoval et al., 2020; Solís-Sánchez et al., 2020, 2026). Una de las principales limitantes para el uso de bacteriófagos en la agricultura es el efecto negativo de la radiación UV solar sobre las partículas virales, por lo cual se diseñó una formulación protectora para los fagos, la cual ya cuenta con protección bajo el modelo de patente otorgada por el IMPI (Rincón-Enríquez et al., 2019). Una revisión más detallada de este caso se puede encontrar en Olivares-Terrones et al. (2024).

Otra de las problemáticas que se han abordado para su control es el tizón de halo del frijol; esta enfermedad es causada por *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* (PspH) puede provocar pérdidas de hasta 43–50% de la producción de frijol en México. Por esto, en el trabajo de Quiñones-Aguilar et al. (2018) se aislaron e identificaron seis cepas del patógeno. También se aislaron siete bacteriófagos capaces de infectarlas. La evaluación identificó que solo uno de los fagos logró disminuir significativamente el daño causado por *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*. También, se han aislado fagos para bacterias asociadas con la marchitez bacteriana del frijol, como *Exiguobacterium acetylum* (Camacho-Beltrán et al., 2024a) y *Microbacterium enclense* (Camacho-Beltrán et al., 2024b). Estos avances podrían ayudar a generar soluciones basadas en fagoterapia para problemáticas con distintas bacterias fitopatógenas asociadas a problemas fitosanitarios de la agricultura mexicana.

Conclusiones

La biotecnología se convierte en una alternativa estratégica frente a las condiciones que amenazan el desarrollo vegetal y, en consecuencia, la seguridad alimentaria global.

En un contexto marcado por el incremento de factores de riesgo y la intensificación del cambio climático, el uso de inductores (elicitores) ha demostrado ser una herramienta eficaz para la protección contra microorganismos fitopatógenos, ofreciendo un amplio espectro de defensa en las interacciones planta-patógeno. La integración de prácticas agrícolas tradicionales con innovaciones biotecnológicas abre un horizonte prometedor: la biotecnología no solo impulsa la creación de nuevas soluciones, sino que también fortalece la resiliencia de los cultivos, previene la pérdida por enfermedades y contribuye a la producción de alimentos nutritivos e inocuos respetando la salud humana, vegetal y ambiental. En síntesis, la biotecnología de los elicitors (fructanos, quitosano, proteínas Hrp y micorrizas), los miARN y el control biológico empleando metabolitos de actinobacterias y virus bacterianos se perfilan como aliados de la agricultura contemporánea, capaces de potenciar la sostenibilidad de los sistemas productivos y garantizar que el campo se fortalezca con vigor frente a los desafíos del futuro, todo ello sin recurrir a la modificación transgénica.

Conflicto de intereses

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

Referencias

- André, A., Cave, M. (2026), Biocontrol potential of indigenous AMF strains: a systematic review and meta-analysis. *Biological Control*, 217, 106054. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2026.106054>
- Barrera, J. F. (2021). Concepto, alcances e implicaciones del control biológico. En H. C. Arredondo Bernal, F. Tamayo Mejía, & L. Á. Rodríguez del Bosque (Eds.), *Fundamento y práctica del control biológico de plagas y enfermedades* (pp. 15–39). Editorial BBA.
- Bojórquez-Orozco, A. M., Arce-Leal, Á. P., Montes, R. A. C., Santos-Cervantes, M. E., Cruz-Mendivil, A., Méndez-Lozano, J., Castillo, A. G., Rodríguez-Negrete, E. A., & Leyva-López, N. E. (2023). Differential Expression of miRNAs Involved in Response to *Candidatus Liberibacter asiaticus* Infection in Mexican Lime at Early and Late Stages of Huanglongbing Disease. *Plants*, 12(5), 1039. <https://doi.org/10.3390/plants12051039>
- Camacho-Beltrán, E., Morales-Aguilar, J. J., López-Meyer, M., Rincón-Enríquez, G., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2024a). Complete genome sequence of the *Exiguobacterium* bacteriophage. *Microbiology Resource Announcements*, 13(7), e00342-24. <https://doi.org/10.1128/mra.00342-24>

- Camacho-Beltrán, E., Morales-Aguilar, J. J., López-Meyer, M., Rincón-Enríquez, G., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2024b). Complete genome sequence of the *Microbacterium enclense* bacteriophage phiMiGM15. *Microbiology Resource Announcements*, 13(6). <https://doi.org/10.1128/mra.00302-24>
- Chaudhary, V., Jangra, S., & Yadav, N. R. (2018). Nanotechnology based approaches for detection and delivery of microRNA in healthcare and crop protection. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 40. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0368-8>
- Cuellar-Espejel, M. del S., Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríquez, G., Hernández-Gutiérrez, R., Mateos-Díaz, J. C., & Valerio-Landa, S. D. (2025). Proteínas Hrp como bioinductores para el control biológico de enfermedades bacterianas en plantas de jitomate y chile bajo invernadero. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 43(4), 54. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2024-25>
- Cuellar-Espejel, M. del S., Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Gutiérrez, R., Mateos-Díaz, J. C., Valerio-Landa, S. D. & Rincón-Enríquez, G. (2024). Elicitors para mejorar la producción vegetal: vacunas vegetales. *Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad*, 2(2), 163–171. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12773668>
- Das, S., Ray, M. K., Panday, D., & Mishra, P. K. (2023). Role of biotechnology in creating sustainable agriculture. *PLOS Sustainability and Transformation*, 2(7), e0000069. <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000069>
- Evangelista-Martínez, Z., Quiñones-Aguilar, E. E., & Rincón-Enríquez, G. (2017). Potencial biotecnológico de las actinobacterias aisladas de suelos de México como fuente natural de moléculas bioactivas: compuestos antimicrobianos y enzimas hidrolíticas. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 21(63), 39–51.
- Evangelista-Martínez, Z., Contreras-Leal, E. A., Corona-Pedraza, L. F., & Gastélum-Martínez, É. (2020). Biocontrol potential of *Streptomyces* sp. CACIS-1.5CA against phytopathogenic fungi causing postharvest fruit diseases. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 117. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00319-9>
- Evangelista-Martínez, Z., Ek-Cen, A., Torres-Calzada, C., & Uc-Vázquez, A. (2022). Potential of *Streptomyces* sp. strain AGS-58 in controlling anthracnose-causing *Colletotrichum siamense* from post-harvest mango fruits. *Journal of Plant Pathology*, 104(2), 553–563. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01104-3>
- Genedy, H. H., Delair, T., Montembault, A. (2022). Chitosan Based MicroRNA Nanocarriers. *Pharmaceutics*, 15(9), 1036. <https://doi.org/10.3390/ph15091036>
- Gordillo-Altamirano, F. L., & Barr, J. J. (2019). Phage therapy in the postantibiotic era. *Clinical Microbiology Reviews*, 32(2). <https://doi.org/10.1128/CMR.00066-18>

- Gowthami, L. (2018). Role of elicitors in plant defense mechanism. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(6), 2806-2812. <https://www.phytojournal.com/archives/2018/vol7issue6/PartAU/7-6-160-363.pdf>
- Hernández-Fonseca, Hugo. (2010). Biotecnología. *Revista Científica*, 20(3), 225-226. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-22592010000300001&lng=es&tlng=es.
- Hoskisson, P. A., & Seipke, R. F. (2020). Cryptic or Silent? the known unknowns, unknown knowns, and unknown unknowns of secondary metabolism. *MBio*, 11(5), e02642-20. <https://doi.org/10.1128/mBio.02642-20>
- Ibarra-Rivera, G., Quiñones-Aguilar, E. E., Solís-Sánchez, G. A., García-Márquez, E., & Rincón-Enríquez, G. (2025). Evaluation of the ΦXaF18 bacteriophage formulation for the control of *Xanthomonas euvesicatoria* in chili pepper plants under field conditions. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, 43(4). <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2024-12>
- Jiang, C., Li, Z., Zheng, L., Yu, Y., & Niu, D. (2023a). Small RNAs: Efficient and miraculous effectors that play key roles in plant-microbe interactions. *Molecular Plant Pathology*, 24(8), 999-1013. <https://doi.org/10.1111/mpp.13329>
- Jiménez-Villota, D. S., & Insuasti, J. (2025). Investigación formativa en biotecnología: una revisión crítica. *Revista Huellas*, 11(2), 85-95. <https://doi.org/10.22267/huellas.251122.42>
- Keen, E. C. (2015). A century of phage research: bacteriophages and the shaping of modern biology. *BioEssays*, 37(1), 6-9. <https://doi.org/10.1002/bies.201400152>
- Kumar, D., & Mukhopadhyay, R. (2025). Climate change and plant pathogens: understanding dynamics, risks and mitigation strategies. *Plant Pathology*, 74(1), 59-68. <https://doi.org/10.1111/ppa.14033>
- López-Velázquez, J. C., García-Morales, S., López-Sánchez, G. P., Montero-Cortés, M. I., Uc-Vázquez, A., & Qui-Zapata, J. A. (2023a). High-density chitosan induces a biochemical and molecular response in *Coffea arabica* during infection with *Hemileia vastatrix*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(22), 16165. <https://doi.org/10.3390/ijms242216165>
- López-Velázquez, J. C., García-Morales, S., Qui-Zapata, J. A., García-Carvajal, Z. Y., Navarro-López, D. E., & García-Varela, R. (2023b). Induction of defense response mediated by inulin from dahlia tubers (*Dahlia* sp.) in *Capsicum annuum*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 42(1), 9. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2305-2>
- López-Velázquez, J. C., Haro-González, J. N., García-Morales, S., Espinosa-Andrews, H., Navarro-López, D. E., Montero-Cortés, M. I., & Qui-Zapata, J. A. (2021).

- Evaluation of the physicochemical properties of chitosans in inducing the defense response of *Coffea arabica* against the fungus *Hemileia vastatrix*. *Polymers*, 13(12), 1940. <https://doi.org/10.3390/polym13121940>
- López-Velázquez, J.C.; Navarro-López, D.E.; Qui-Zapata, J.A.; León-Morales, J.M.; Saavedra-Loera, D.I.; García-Morales, S. (2019). Effect of selenite and inulin on *Capsicum annuum* L.-*Phytophthora capsici* interaction in greenhouse. *Plant Biotechnol* 19, 25–34.
- Ly, Y., Zhong, Y., Jiang, B., Yan, H., Ren, S., & Cheng, C. (2023). MicroRNA miR171b positively regulates resistance to huanglongbing of citrus. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5737. <https://doi.org/10.3390/ijms24065737>
- Maurice, C. F., Bouvier, C., de Wit, R., & Bouvier, T. (2013). Linking the lytic and lysogenic bacteriophage cycles to environmental conditions, host physiology and their variability in coastal lagoons. *Environmental Microbiology*, 15(9), 2463–2475. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12120>
- Minchev, Z., Garcia, J. M., Berrio, E., Pozo M. J., Jordi Gamir (2026). Primed responses to damage signals mediate mycorrhiza-induced resistance in tomato plants. *Journal of Experimental Botany*, 77(12), 3849–3863. <https://doi.org/10.1093/jxb/erag064>
- O'Brien, J., Hayder, H., Zayed, Y., & Peng, C. (2018). Overview of microRNA biogenesis, mechanisms of actions, and circulation. *Frontiers in Endocrinology*, 9, 402. <https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00402>
- O'Brien, Philip A. (2017). Biological control of plant diseases. *Australasian Plant Pathology*, 46(4), 293–304. <https://doi.org/10.1007/s13313-017-0481-4>
- Olivares-Terrones, R. A., Quiñones-Aguilar, E. E., Solís-Sánchez, G. A., Siri-Tomás, M. I., & Rincón-Enríquez, G. (2024). El uso de bacteriófagos para el control de enfermedades en la agricultura: un caso de estudio para el desarrollo de un biobactericida. *Enfoques Transdisciplinarios: Ciencia y Sociedad*, 2(2), 149–161. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12773571>
- Patoliya, J., Thaker, K., Kumar, P., Jain, N., & Joshi, R. (2026). From pathogen effectors to plant enhancers - harpin proteins as novel biostimulants: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 365, 152410. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.152410>
- Quiñones-Aguilar, E. E., Reyes-Tena, A., Hernández-Montiel, L. G., & Rincón Enríquez, G. (2018). Bacteriófagos en el control biológico de *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* agente causal del tizón de halo del frijol. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(14), 191–202. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1159>
- Quiñones-Aguilar, E. E., Reyes-Tena, A., Rincón-Enríquez, G., Rico-Aguilar, J. C., & López-Pérez, L. (2025). Extractos de actinomicetos contra *Pseudomonas syringae*

- pv. *phaseolicola* en *Phaseolus vulgaris*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 43(4), 73. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2024-02>
- Reyes-Tena, A., Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríquez, G., & López-Pérez, L. (2016). Micorrización en *Capsicum annuum* L. para promoción de crecimiento y bioprotección contra *Phytophthora capsici* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(4), 857–870. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i4.260>
- Reyes-Tena, A., Rincón-Enríquez, G., López-Pérez, L., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2017). Effect of mycorrhizae and actinomycetes on growth and bioprotection of *Capsicum annuum* L. against *Phytophthora capsici*. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 54(3), 513–522. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/17.4245>
- Rincón-Enríquez, G., García-Márquez, E., Quiñones-Aguilar, E. E., & Ibarra-Rivera, G. (2019). *Formulación protectora contra radiación solar UV para agentes de biocontrol en cultivos agrícolas*. Patente <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?d=MX/2024/33644>
- Rincón-Enríquez, G., López-Pérez, L., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2014). Efectividad biológica *in vitro* de actinomicetos sobre el agente causal del tizón de halo en frijol. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 229–234. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802014000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Rincón-Enríquez, G., Quiñones Aguilar, E. E., & Evangelista-Martínez, Z. (2016). Los actinomicetos y su aplicación biotecnológica. *Revista Elementos*, 101(23), 59–64. https://www.researchgate.net/publication/297758305_Los_actinomicetos_y_su_aplicacion_biotecnologica
- Ríos-Muñiz, D. E., & Evangelista-Martínez, Z. (2025). Efecto antifúngico de *Streptomyces* sp. GCAL-9 y su extracto bioactivo sobre *Colletotrichum* spp., agente causal de la antracnosis. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 29 (Especial), 57–58. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.25.29.37>
- Ríos-Sandoval, M., Quiñones-Aguilar, E. E., Solís-Sánchez, G. A., Enríquez-Vara, J. N., & Rincón-Enríquez, G. (2020). Complete genome sequence of *Xanthomonas vesicatoria* bacteriophage ΦXaF18, a contribution to the biocontrol of bacterial spot of pepper in Mexico. *Microbiology Resource Announcements*, 9(16). <https://doi.org/10.1128/MRA.00213-20>
- Sánchez-Jiménez, E., Herrejón-López, K. A., Montero-Cortés, M. I., López-Velázquez, J. C., García-Morales, S., & Qui-Zapata, J. A. (2025). Evaluation of *Dahlia* and *Agave* fructans as defense inducers in tomato plants against *Phytophthora capsici*. *Polysaccharides*, 6(3), 72. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides6030072>
- Sharma, N., & Prasad, M. (2020). Silencing AC1 of Tomato leaf curl virus using artificial microRNA confers resistance to leaf curl disease in transgenic to-

- mato. *Plant Cell Reports*, 39(11), 1565-1579. <https://doi.org/10.1007/s00299-020-02584-2>
- Singh, V., Shikha, K., Singh, S., Singh, A. P., & Jaiswal, D. K. (2019). Application of plant biotechnology in improvement of vegetable breeding. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(04), 1428-1435. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.166>
- Solís-Sánchez, G. A., Quiñones-Aguilar, E. E., Fraire-Velázquez, S., Vega-Arreguín, J., & Rincón-Enríquez, G. (2020). Complete Genome sequence of XaF13, a novel bacteriophage of *Xanthomonas vesicatoria* from Mexico. *Microbiology Resource Announcements*, 9(5). <https://doi.org/10.1128/MRA.01371-19>
- Solís-Sánchez, G. A., Quiñones-Aguilar, E. E., Avalos-Salgado, A. F., Olivares-Terrones, R. A., Ríos-Sandoval, M., & Rincón-Enríquez, G. (2026). Hybrid genome reanalysis of bacteriophage XaF13 infecting *Xanthomonas vesicatoria* provides insights into its phylogenetic relationships within the family inoviridae. *Agronomy*, 16(11), 1090. <https://doi.org/10.3390/agronomy16111090>
- Tang, J., Gu, X., Liu, J., & He, Z. (2021). Roles of small RNAs in crop disease resistance. *Stress Biology*, 1(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s44154-021-00005-2>
- Thakur, M., & Sohal, B. S., (2013). Role of Elicitors in Inducing Resistance in Plants against Pathogen Infection: A Review. *International Scholarly Research Notices*, 2013, 762412. <https://doi.org/10.1155/2013/762412>
- Trinidad-Cruz, J. R., Enríquez-Vara, J. N., Rincón-Enríquez, G., & Quiñones-Aguilar, E. E. (2026). Identificación molecular y actividad antifúngica *in vitro* de aislados actinobacterianos contra *Colletotrichum gloeosporioides*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 13(1). <https://doi.org/10.19136/era.a13n1.4537>
- Tripathi, A. N., Tiwari, S. K., Sharma, S. K., Sharma, P. K., & Behera, T. K. (2024). Current status of bacterial diseases of vegetable crops. *Vegetable Science*, 51(Special Is), 106–117. <https://doi.org/10.61180/vegsci.2024.v51.spl.10>
- Valerio-Landa, S.D., Quiñones-Aguilar, E.E. & Rincón-Enríquez, G. (2020). *Método para la obtención y aplicación de un inductor de resistencia contra agentes fitopatógenos en plantas*. Patente de Invención MX/a/2020/013638 ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (Sometido el 14 de diciembre de 2020 ante el IMPI). <https://vidoc.impi.gob.mx/visor?d=MX/E/2020/087009>
- Valerio-Landa, S.D., Quiñones-Aguilar, E.E., Enríquez-Vara, J.N., Hernández-Gutiérrez, R., Hernández-Montiel, L.G. & Rincón-Enríquez, G. (2021a). Método de inducción, aislamiento y selección de proteínas HRP de bacterias fitopatógenas, una fuente potencial de inductores de resistencia vegetal. *Mensaje Bioquímico*, 45, 70-78. <https://10.22201/fm.0188137xe.2021.45.07>

- Vargas-Gómez, K. A., Evangelista-Martínez, Z., Gastélum-Martínez, É., Quiñones-Aguilar, E. E., & Rincón-Enríquez, G. (2023). Extracellular metabolites production by *Streptomyces* sp. CACIS-1.16CA and their effects on soil-borne phytopathogenic fungi (preprint). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2613097/v1>
- Valerio-Landa, S.D., Quiñones-Aguilar, E.E., Hernández-Gutiérrez, R. & Rincón-Enríquez, G. (2023). *Inductor biológico proteico para el control de enfermedades de plantas*. Patente de Invención MX-a-2023-008646 ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (Sometido el 21 de julio de 2023 ante el IMPI).
- Vargas-Gómez, K. A., Evangelista-Martínez, Z., Gastélum-Martínez, É., Uc-Varguez, A., Quiñones-Aguilar, E. E., & Rincón-Enríquez, G. (2025). Broad spectrum antagonistic activity of *Streptomyces* sp. CACIS-1.16CA against phytopathogenic fungi. *Microbiology Research*, 16(9), 193. <https://doi.org/10.3390/microbiolres16090193>
- Verma, K. K., Song, X., Kumari, A., Jagadesh, M., Singh, S. K., Bhatt, R., Singh, M., Seth, C. S., & Li, Y. (2025). Climate change adaptation: challenges for agricultural sustainability. *Plant, Cell & Environment*, 48(4), 2522-2533. <https://doi.org/10.1111/pce.15078>
- Waage, J. K., & Greathead, D. J. (1988). Biological control: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 318(1189), 111–128. <https://doi.org/10.1098/rstb.1988.0001>
- Zhang, Y., Waseem, M., Zeng, Z., Xu, J., Chen, C., Liu, Y., Zhai, J., & Xia, R. (2022). MicroRNA482/2118, a miRNA superfamily essential for both disease resistance and plant development. *New Phytologist*, 233(5), 2047-2057. <https://doi.org/10.1111/nph.17853>