

## Resistencia sistémica inducida: un mecanismo extraordinario de defensa vegetal

Las plantas son severamente afectadas por enfermedades causadas por diversos patógenos. Los fungicidas sintéticos son importantes en el control de las enfermedades, sin embargo, su uso intensivo tiene efectos perjudiciales sobre el medio ambiente, la sostenibilidad del ecosistema y la salud humana. No obstante, en aquellas interacciones entre plantas y microorganismos benéficos, las plantas pueden generar respuestas inmunitarias e inducir un sistema de defensa sistémica para aminorar el ataque de patógenos. Este trabajo aborda el mecanismo de la resistencia sistémica inducida, los principales factores implicados en su proceso y los componentes involucrados en la defensa vegetal.

Palabras clave: biocontrol, rizobacterias, genes de defensa, enzimas, fitopatógenos.

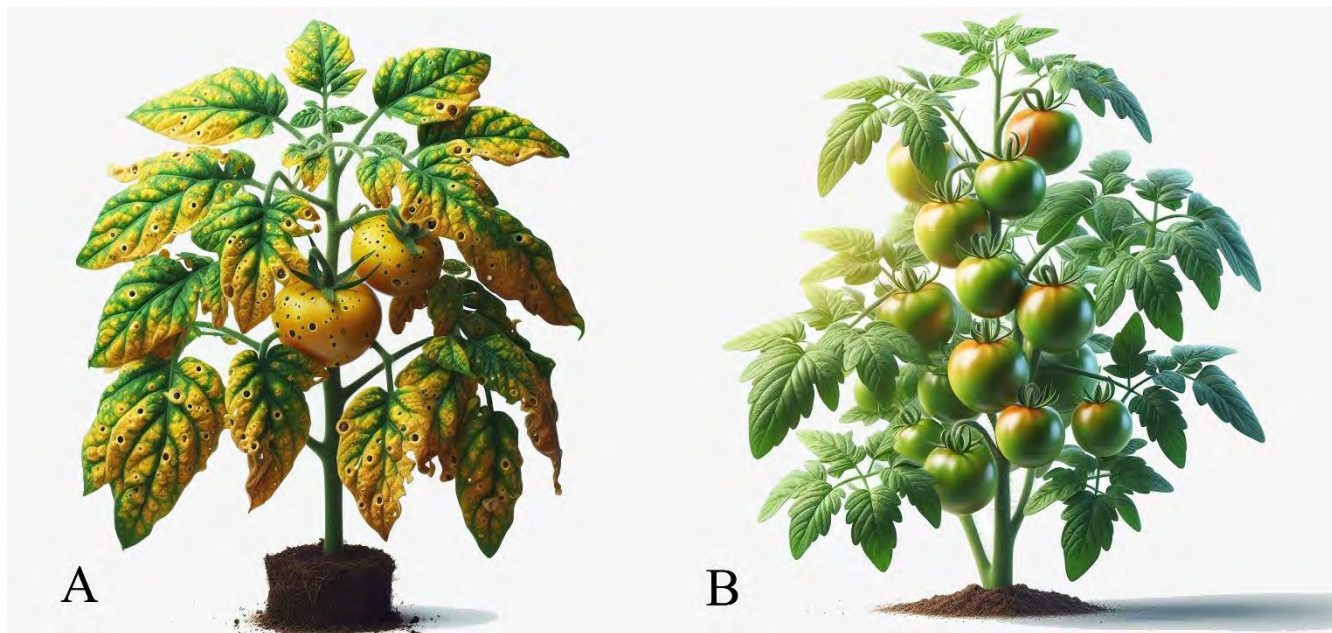
ALECSIS DE MELCHOR PADRÓN-CHAN Y ARTURO REYES-RAMÍREZ

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Conkal,  
Av. Tecnológico S/N, 97345, Conkal, Yucatán, México.  
[alecsis.padron@itconkal.edu.mx](mailto:alecsis.padron@itconkal.edu.mx)

Las plantas por su naturaleza inmóvil están más expuestas a situaciones ambientales adversas y en contacto con diversos microorganismos, algunos benéficos y otros potencialmente patógenos. Los microorganismos patógenos pueden causar enfermedad (virulencia) a una planta hospedante susceptible, o no causar enfermedad (avirulencia) a una planta hospedante resistente (Atkinson y Urwin 2012). La virulencia se define como la capacidad de un patógeno (hongos, bacterias, virus) de causar enfermedad a su hospedero, ya sea una planta o animal (NCI 2023).

Madriz (2002) menciona que en la interrelación entre los dos organismos (patógeno-planta), es conveniente utilizar los términos interacción compatible e interacción incompatible. Una relación compatible es una interacción entre un patógeno virulento y una planta hospedante susceptible y se pueden observar síntomas de la enfermedad; mientras que una relación incompatible se establece cuando el patógeno es avirulento y la planta hospedante es resistente, en esta interacción no se establece la enfermedad (Figura 1). El control actual de fitopatógenos depende en gran medida de fungicidas sintéticos, los cuales no son ambientalmente sostenibles, además aceleran en los patógenos la resistencia a fungicidas (Moumita y Somdatta 2022).

Sin embargo, durante una interacción compatible, la previa relación de la planta susceptible con ciertos microorganismos benéficos, puede estimular respuestas de defensa que le permite aminorar o cesar el daño del patógeno (Atkinson & Urwin 2012, Aydi *et al.* 2017, Qiu *et al.* 2021, Gogoi *et al.* 2023), es decir, una planta sufre menos el efecto nocivo de ciertos patógenos a través



**Figura 1.** Interacción patógeno-hospedante, **A.** interacción compatible, donde se establece la enfermedad, **B.** interacción incompatible, donde no se establece la enfermedad (Figura: Alecsis Padrón creadas con Bing IA).

de un sistema de defensa inducido y son justamente las asociaciones entre las plantas y microorganismos benéficos las que estimulan esta resistencia. Este mecanismo de defensa vegetal es denominado resistencia sistémica inducida (RSI), y su protección no se limita al sitio inicial donde interactúa el microorganismo benéfico con las raíces de las plantas, sino que se expande a través de las raíces, hojas y tallos de la planta (Figura 2), proporcionando protección sistémica (similar a una vacuna), es decir los microorganismos benéficos estimulan el sistema inmune de la planta, haciéndola resistente contra futuras infecciones por patógenos (Pieterse *et al.* 2014).

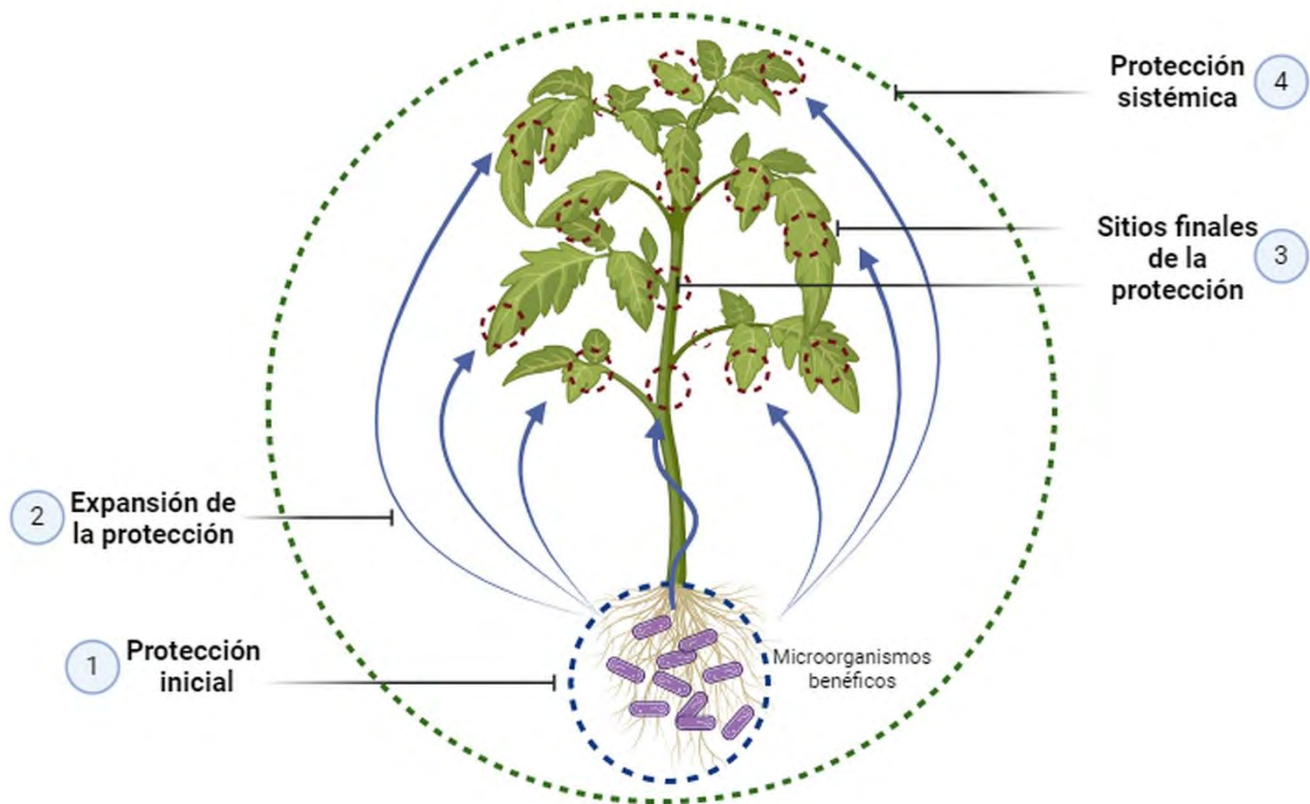
La resistencia sistémica es inducida comúnmente por las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, que abarcan una amplia gama de géneros incluyendo *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter* y *Serratia* (Kloepper 1992, Aydi *et al.* 2017, Gogoi *et al.* 2023), en particular, *Bacillus* es objeto de estudio por su papel en la defensa vegetal como agentes de biocontrol (Aydi *et al.* 2017, Shafi *et al.* 2017, Qiu *et al.* 2021).

La RSI es un mecanismo de defensa vegetal activa, implica una serie de acontecimientos complejos y coordinados, los factores principales implicados en este proceso incluyen: el “reconocimiento”. En primera instancia para inducir esta resistencia sistémica,

los microorganismos benéficos son percibidos como extraños en las células de la planta hospedante, debido a la presencia de moléculas que tienen estructuras o patrones químicos exclusivos de los microorganismos benéficos, comúnmente lipopolisacáridos, flagelina bacteriana, lipopéptidos cíclicos, sideróforos, antibióticos y compuestos volátiles (Ongena *et al.* 2007), y son reconocidos por receptores de reconocimiento membranales de la planta PRRs (Figura 3).

Como segundo proceso se da una mayor “transmisión de señales” relacionados con la defensa vegetal, a continuación, se inducen diferentes proteínas que participan en el aumento de la inmunidad innata en las plantas, destaca un grupo de proteínas (PR) divididas en 17 familias, algunas de las cuales poseen actividades definidas como las PR-2 ( $\beta$ -1,3-glucanasa GLU) y PR-3 (quitinasas CHI) (Figura 3), que desempeñan funciones importantes en la defensa contra fitopatógenos que contienen  $\beta$ -1,3-glucano y quitina, componentes principales de la pared celular de los patógenos (Tyagi *et al.* 2022).

Como tercer proceso se da una “activación de rutas de señalización”, donde los receptores de reconocimiento membranales de la planta activan una o más vías de señalización dentro de la célula vegetal, como las vías de las fitohormonas etileno (ET) y ácido jasmónico (AJ), como cuarto paso las



Created in BioRender.com 

**Figura 2.** Mecanismo de la resistencia sistémica inducida (Figura: Alecsis Padrón, creada en BioRender).

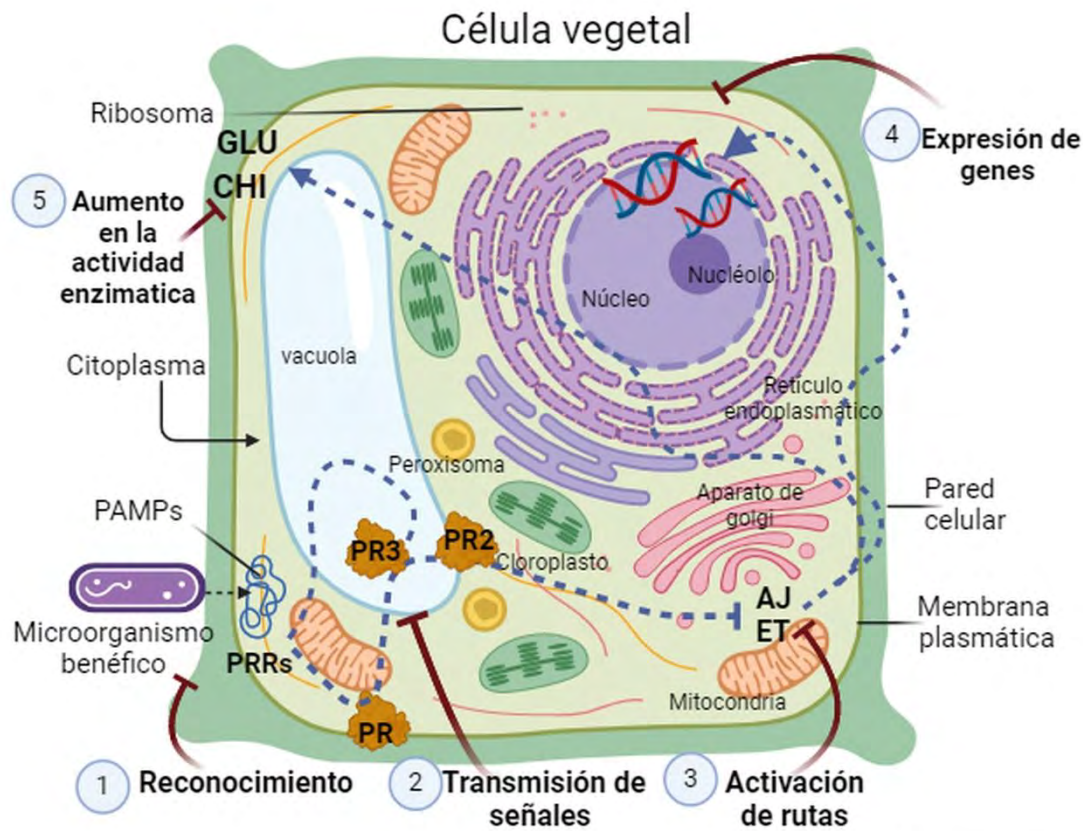
hormonas ET y AJ coordinan las respuestas de defensa en las plantas, como la expresión de genes relacionados con la defensa vegetal, y como quinto proceso se da un aumento en las actividades de enzimas de defensa como la GLU y CHI (Figura 3), comprometiendo la integridad y supervivencia de los fitopatógenos (Kumar *et al.* 2011).

Esta serie de sucesos son la base de la resistencia sistémica inducida y conlleva la activación de una cascada de señales (moleculares, bioquímicas, fisiológicas y anatómicas) que inducen la defensa vegetal de una manera amigable con el ambiente (Ghosh & Panja 2021). Sin embargo, diferentes especies o cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal pueden tener diferentes capacidades para inducir la RSI en las plantas, es importante tener en cuenta que la interacción planta-microorganismo benéfico es altamente específica y dependiente, lo que significa que los efectos bene-

ficiosos pueden variar según las condiciones ambientales, la genética de la planta y la composición de la comunidad microbiana (Kumar *et al.* 2011), destacando la importancia de la selección de cepas eficaces para maximizar los beneficios en el control de patógenos.

Por ejemplo, un estudio realizado por Aydi *et al.* (2017) reportaron que la cepa *B. amyloliquefaciens* subsp. *plantarum* str. SV65 muestra capacidad de inducir RSI al suprimir la enfermedad del marchitamiento por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, y mejorar el crecimiento del tomate.

Así mismo Qiu *et al.* (2021) reportaron que la inoculación en plantas de tabaco con *B. velezensis* SDTB022 estimuló las respuestas de defensa contra *Phytophthora parasitica* var. *nicotianae* en condiciones de campo. En este caso se detectó un aumento de las actividades de las enzimas de defensa, además los resultados cuantitativos de la PCR en tiempo real



Created in BioRender.com bio

**Figura 3.** Modo de acción de la resistencia sistémica inducida (Figura: Alecsis Padrón creada en BioRender).

mostraron que los genes *PR1a*, *PR3* y *PR5* estaban regulados positivamente.

Por su parte Gogoi *et al.* (2023) señalan que *B. megaterium* JPR68 estimuló la RSI en *Capsicum chinense* contra *Rizoctonia solani*, la inoculación con la cepa estimuló la expresión de los genes relacionados con la defensa vegetal, y aumentó la actividad de enzimas con actividad antifúngica, la observación microscópica no indicó ningún efecto dañino en las células del hospedante.

La RSI estimula los propios mecanismos de defensa innatos de las plantas, y su comprensión es crucial para el desarrollo de estrategias de control de fitopatógenos de una manera sostenible, segura, eficiente, duradera y persistente. Considerando los desafíos actuales por minimizar la aplicación de fungicidas sintéticos en la agricultura, el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el control de enfermedades vegetales puede mejorar la

productividad de los cultivos, y dar continuidad al desarrollo sostenible para las generaciones futuras, fortaleciendo una línea de investigación emergente con gran potencial en el control de patógenos.

### Agradecimientos

A.M.P.C. agradece al CONAHCyT por la beca otorgada para realizar sus estudios de Doctorado.

### Referencias

- Atkinson N.J. y Urwin P.E. 2012. The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field *Journal of Experimental Botany* 63: 3523-3544. <https://doi:10.1093/jxb/err313>
- Aydi R.B.A. C., Stedel C., Garagounis C., Nefzi A., ... y Daami-Remadi M. 2017. Involvement of lipopeptide antibiotics and chitinase genes and induction of host defense in suppression of *Fusa-*

- rium* wilt by endophytic *Bacillus* spp. in tomato. *Crop Protection* 99: 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.05.008>
- Ghosh S.K. y Panja A. 2021.** Different mechanisms of signaling pathways for plant protection from diseases by fungi. In: *Biocontrol Agents and Secondary Metabolites*. Eds. Sudisha Jogaiah. Ed. Woodhead Publishing pp: 591-630. ISBN 9780128229194. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822919-4.00026-0>
- Gogoi P., Phukan T. y Saikia R. 2023.** Systemic resistance induced by plant growth-promoting rhizobacteria in Bhut Jolokia (*Capsicum chinense* Jacq.) suppressed the collar rot disease. *Scientia Horticulturae* 324: 112625 <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112625>
- Kloepper J.W. 1992.** Plant growth-promoting rhizobacteria as biological control agents. In: *Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management*. Ed. Marcel Dekker Inc. pp. 255-274. New York. USA. ISBN: 9780824787370.
- Kumar H., Kawai T. y Akira S. 2011.** Pathogen recognition by the innate immune system. *International Reviews of Immunology* 30: 16-34. <https://doi.org/10.3109/08830185.2010.529976>
- Madriz K. 2002.** Mecanismos de defensa en las interacciones planta-patógeno. *Manejo Integrado de Plagas y agroecología*. 63: 22-32. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6562> (consultado: 12 octubre 2023).
- Moumita D. y Somdatta G. 2022.** Arbuscular mycorrhizae in plant immunity and crop pathogen control. *Rhizosphere* 22: 100524. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100524>.
- NCI [National Cancer Institute] 2023.** Diccionarios del NCI. Disponible en: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionariocancer/def/virulento>. (Consultado: 3 mayo 2024).
- Ongena M., Jourdan E., Adam A., Paquot ... y Thonart P. 2007.** Surfactin and fengycin lipopeptides of *Bacillus subtilis* as elicitors of induced systemic resistance in plants. *Environmental Microbiology* 9: 1084-90. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01202.x>
- Pieterse C.M.J., Zamioudis C., Berendsen R.L., Weller D.M., ... y Bakker P.A.H.M. 2014.** Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology* 52: 347-375. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340>
- Qiu Y., Hao Y., Sun S.M., Wang Y.Q., ... y Wang H.Y. 2022.** Use of *Bacillus velezensis* SDTB022 against tobacco black shank (TBS) and the biochemical mechanism involved. *Biological Control* 165: 104785. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104785>
- Shafi J., Tian H. y Ji M. 2017.** *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review. *Agriculture and Environmental Biotechnology* 31: 446-459. <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950>
- Tyagi P., Singh A., Gupta A., Prasad M. and Ranjan R. 2022.** Mechanism and function of salicylate in plant toward biotic stress tolerance. In: *Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture*. Eds: Tariq Aftab, M. Naeem. Ed. Academic Press pp 131-164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91005-7.00018-7>.

Desde el Herbario CICY, 16: 230-234 (7-noviembre-2024), es una publicación semanal editada por el Herbario CICY del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., con oficinas en Calle 43 x 32 y 34 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México. Tel. 52 (999) 942-8330 Ext. 110, [www.cicy.mx/Sitios/Desde\\_Herbario/](http://www.cicy.mx/Sitios/Desde_Herbario/), [webmas@cicy.mx](mailto:webmas@cicy.mx). Editores responsables: Rodrigo Duno de Stefano, Patricia Rivera Pérez y Lilia Lorena Can Itzá. Reserva de Derechos al Título Exclusivo No. 04-2016-041413195700-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, ISSN: 2395-8790. Responsable de la publicación: José Fernely Aguilar Cruz, Calle 43 x 32 y 34 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México. Fecha de última modificación: 7 de noviembre de 2024. Las opiniones expuestas por los autores no necesariamente expresan la postura del editor de la publicación. De la misma manera, la responsabilidad sobre la veracidad y la precisión de los contenidos, le corresponde totalmente a los autores de los ensayos.