

Sección: Hot Science

Cuando la pared celular lucha: el papel de los xiloglucanos durante la micorrización arbuscular

When the cell wall fights: the role of xyloglucans during arbuscular mycorrhization

Luis Gerardo Sarmiento-López^{1,2*}

Melina López-Meyer²

Mariana Esther Cesario-Solis¹

¹Unidad de Investigación en Ambiente y Salud, Universidad Autónoma de Occidente, Unidad Regional Los Mochis, Los Mochis, Sinaloa, México.

²Departamento de Biotecnología Agrícola, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa, Guasave, Sinaloa, México.

*Autor para la correspondencia: luis.sarmiento@uadeo.mx

RESUMEN

Las plantas enfrentan múltiples tipos de estrés ambiental que limitan su desarrollo y crecimiento. La pared celular vegetal es una estructura dinámica que actúa como barrera protectora. Entre sus componentes sobresalen los xiloglucanos, polisacáridos que interactúan con la celulosa y regulan la flexibilidad de los tejidos. La micorrización arbuscular es una asociación simbiótica que mejora la nutrición de la planta y puede regular su interacción con otros microorganismos activando genes que modifican la pared vegetal, lo que permite resistir a patógenos. Conocer cómo se desarrollan estos procesos facilitará el diseño de estrategias sostenibles para mejorar la resiliencia de los cultivos agrícolas.

Palabras clave: Pared celular, micorriza arbuscular y xiloglucanos.

SUMMARY

Plants are exposed to diverse environmental stresses that limit growth and development. The plant cell wall, a dynamic and complex structure, serves as a critical protective barrier. Xyloglucans, key polysaccharide components, interact with cellulose to modulate cell wall flexibility and tissue mechanics. Arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances nutrient acquisition and can influence interactions with other microorganisms by activating genes involved in cell wall remodeling, thereby increasing pathogen resistance. Understanding the molecular and physiological mechanisms underlying these processes is crucial for designing sustainable strategies to enhance crop resilience and productivity under challenging environmental conditions.

Keywords: Cell wall, arbuscular mycorrhizal, xyloglucans.

Introducción

Las plantas, desde que colonizaron los ambientes terrestres, han enfrentado condiciones ambientales adversas, como temperaturas extremas, estrés hídrico y salino, ataques por patógenos, entre otras condiciones. En tiempos recientes, estas problemáticas se han intensificado a nivel mundial y representan un reto importante para la agricultura. Las plantas suelen estar expuestas simultáneamente a diferentes tipos de estrés, cuya respuesta difiere de la provocada por factores individuales. Uno de los organelos más afectados por el estrés es la pared celular y su daño extremo puede conducir a la muerte de la planta. Además de proporcionar soporte estructural, la pared celular funciona como una barrera dinámica y como un sistema de percepción durante la interacción con microorganismos del suelo, tanto benéficos como patógenos. Algunos microorganismos benéficos, como los hongos micorrízicos arbusculares, inducen modificaciones en la pared celular para establecer procesos de colonización, lo que ha llevado a las plantas a desarrollar mecanismos de regulación asociados con la biosíntesis y remodelación de sus componentes estructurales. Entre estos componentes destacan los xiloglucanos (XyG), hemicelulosas fundamentales para la organización y plasticidad de la pared celular primaria.

El avance de las tecnologías bioinformáticas ha permitido profundizar en el estudio de los cambios asociados con la biosíntesis y remodelación de los XyG, tanto para contrarrestar los efectos de los diferentes tipos de estrés ambiental, como para responder a los microorganismos con los que interacciona. Este conocimiento puede contribuir a reducir los problemas ecológicos, ambientales y económicos asociados al estrés abiótico y biótico en la agricultura moderna.

La pared celular, una estructura estratégica de defensa

La pared celular vegetal es una estructura formada por cadenas de polímeros y algunas proteínas. Su función es dar forma a la célula y actuar como una estructura rígida que resista la presión interna y mantenga su firmeza. Esta pared está compuesta por tres materiales principales: la celulosa, la hemicelulosa y la pectina, cada uno aportando características y funciones únicas [1] (Fig. 1).

Aunque todas las plantas del planeta pertenecen al mismo reino, la composición y estructura de sus paredes celulares presentan variaciones entre especies. Estas diferencias no solo se observan a nivel del organismo completo, sino también entre distintos tejidos y tipos celulares dentro de una misma planta, lo que evidencia que la composición de la pared celular es dinámica y altamente especializada.

La *celulosa* es el componente más abundante de la pared celular y el que le confiere rigidez y resistencia a la planta. La celulosa es una cadena formada por muchas unidades de azúcar glucosa, lo que da lugar a fibras muy fuertes. Gracias a que la celulosa puede combinarse con otros componentes como la hemicelulosa y la pectina (Fig. 1), la pared celular representa una barrera contra el ataque de microorganismos que pueden causar enfermedades. Las células vegetales se mantienen unidas gracias a las *pectinas*, polisacáridos complejos ricos en ácido galacturónico y otros azúcares ramificados, cuya alta capacidad de retención de agua contribuye a la plasticidad y porosidad de la pared celular. Estas moléculas forman una capa delgada denominada lámina media, la cual actúa como un “pegamento” que mantiene adheridas a las células vegetales entre sí. La *hemicelulosa* también está formada por cadenas de azúcares que se unen a la celulosa y ayudan a organizar la pared celular, regulando la interacción entre ambos componentes. En una gran variedad de plantas, principalmente dicotiledóneas, la hemicelulosa más común es el XyG [2] (Fig. 1).

Las células vegetales pueden generar

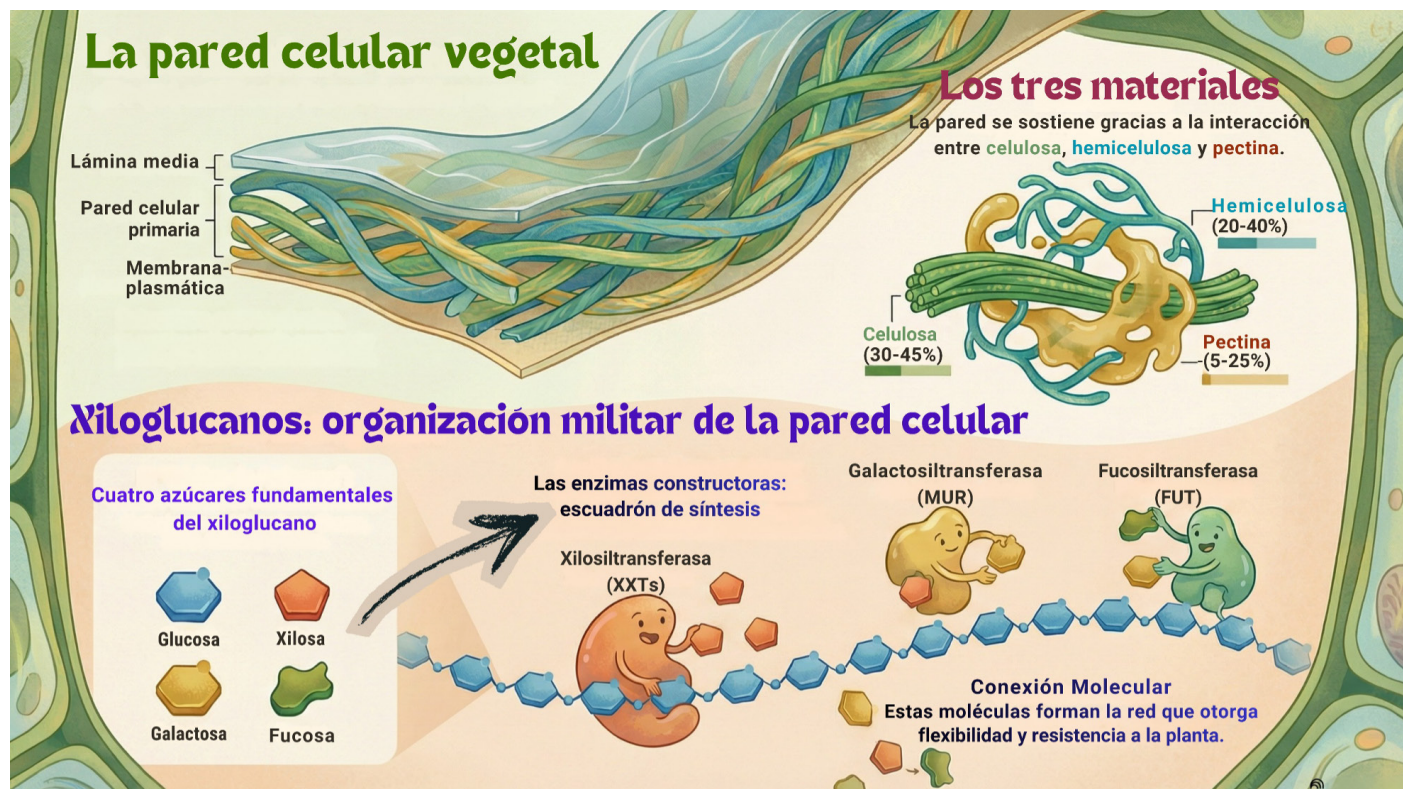


Figura 1. Estructura de una pared celular primaria y la composición química de sus componentes principales. En la sección inferior se ilustra la composición fundamental de azúcares del xiloglucano y la acción de enzimas biosintéticas como xilosiltransferasas (XXTs), galactosiltransferasas (MUR) y fucosiltransferasas (FUTs), responsables de la incorporación de xilosa, galactosa y fucosa a la cadena lateral de glucosa.

dos tipos principales de pared celular: la pared primaria y la pared secundaria. La pared primaria se encuentra en células jóvenes en crecimiento y se caracteriza por ser relativamente flexible, debido a su composición rica en celulosa, hemicelulosas y pectinas. Mientras la celulosa proporciona soporte estructural, las hemicelulosas contribuyen a la organización de las microfibrillas y las pectinas aportan plasticidad, hidratación y adhesión entre células. En contraste, la pared secundaria se deposita en células más maduras o especializadas, como las del colénquima y esclerénquima, donde se requiere una mayor resistencia mecánica. Aunque estas paredes también contienen celulosa y hemicelulosas, presentan una menor proporción de pectinas y un alto contenido de lignina, polímero que les confiere rigidez y resistencia adicional [2,3].

Gracias a esta composición y capacidad

de reorganización, la pared celular vegetal no es una estructura estática, sino una barrera dinámica capaz de responder a diferentes condiciones ambientales. Las modificaciones en sus componentes permiten a las plantas mantener la integridad de sus tejidos y adaptarse frente a condiciones adversas, como el estrés ambiental o el ataque de microorganismos patógenos.

Los xiloglucanos: el escudo flexible de las plantas

Los xiloglucanos (XyG) son uno de los componentes fundamentales de la pared celular. Constituyen el esqueleto químico principal de la hemicelulosa en la mayoría de las plantas terrestres, excepto en las gramíneas. Estas moléculas están formadas principalmente por

cadenas de glucosa decoradas con otros azúcares, como xilosa, galactosa y fucosa, que se combinan de distintas maneras (Fig. 1). En las células jóvenes en crecimiento, los XyG son muy abundantes. Estas moléculas tienen la capacidad de unirse a la celulosa para formar una red que fortalece la pared celular, confiéndole, a la vez, flexibilidad y resistencia. De manera sencilla, la “misión” de los XyG es ayudar a mantener protegida y estable la estructura de la planta mientras esta crece o enfrenta condiciones adversas.

Aunque todos los XyG parten de una estructura básica formada por azúcares, su composición puede variar considerablemente dependiendo de la especie vegetal, el tipo de tejido o las condiciones ambientales a las que esté expuesta la planta. Estas variaciones generan distintos tipos de XyG, cada uno con propiedades particulares que contribuyen a la capacidad adaptativa de la pared celular frente a estímulos como la sequía, la salinidad, los cambios químicos del suelo o el ataque de microorganismos patógenos[3] (Fig. 1).

De manera simbólica, esta diversidad puede imaginarse como un “ejército de azúcares a medida”, donde cada combinación de XyG representa un tipo distinto de soldado preparado para responder a un problema específico. Dependiendo de la amenaza, la planta puede “equipar” a estos soldados con diferentes combinaciones de azúcares para reforzar ciertas zonas de la pared celular y ayudar a aliviar el estrés.

En esta “organización militar”, la planta cuenta con elementos equivalentes a oficiales o estrategias, representados por diversas enzimas encargadas de sintetizar, modificar y reorganizar los XyG. Estas enzimas trabajan principalmente, en el “aparato de Golgi”, un organelo celular que funciona como un centro de ensamblaje y distribución del “ejército biológico”. A diferencia de la celulosa que es ensamblada en la membrana plasmática, los XyG ya “armados” son transportados hacia re-

giones específicas de la pared celular, como soldados rasos desplegados hacia la primera línea de defensa, donde participan activamente en el mantenimiento de la estructura y en la respuesta frente a condiciones ambientales adversas.

La micorrización: una alianza que remodela la pared celular

Sin embargo, las modificaciones de la pared celular también ocurren en respuesta a interacciones de la planta con microorganismos benéficos, como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). La micorriza arbuscular es una relación simbiótica entre plantas y algunos hongos del suelo pertenecientes al filo *Mucoromycota* subfilo *Glomeromycotina*. En esta alianza, ambos socios se benefician: el hongo aporta a la planta agua y nutrientes, especialmente fósforo que toma del suelo, y la planta abastece al hongo de “alimento” en forma de azúcares y lípidos para su crecimiento y desarrollo. Esta relación benéfica se da en el 80 % de las plantas terrestres y ha sido clave para su supervivencia y adaptación a diferentes ambientes a lo largo de la evolución.

En esta asociación, el hongo invade la raíz de la planta, de tal manera que parte del hongo se encuentra en el suelo, y otra parte dentro de la raíz. Para que la simbiosis se establezca, el hongo debe penetrar la raíz y dirigirse hasta el interior de algunas células, formando una estructura similar a un arbusto, llamada arbusculo (Fig. 2). En estas estructuras la membrana periarbuscular funciona como sitio de intercambio, donde el hongo entrega agua y nutrientes a la planta, y la planta transfiere compuestos energéticos al hongo. Para permitir la formación de los arbusculos, la pared celular vegetal debe reorganizarse y volverse más flexible, permitiendo alojar al hongo sin que la célula pierda su integridad.

Esta asociación, mejora la nutrición de la

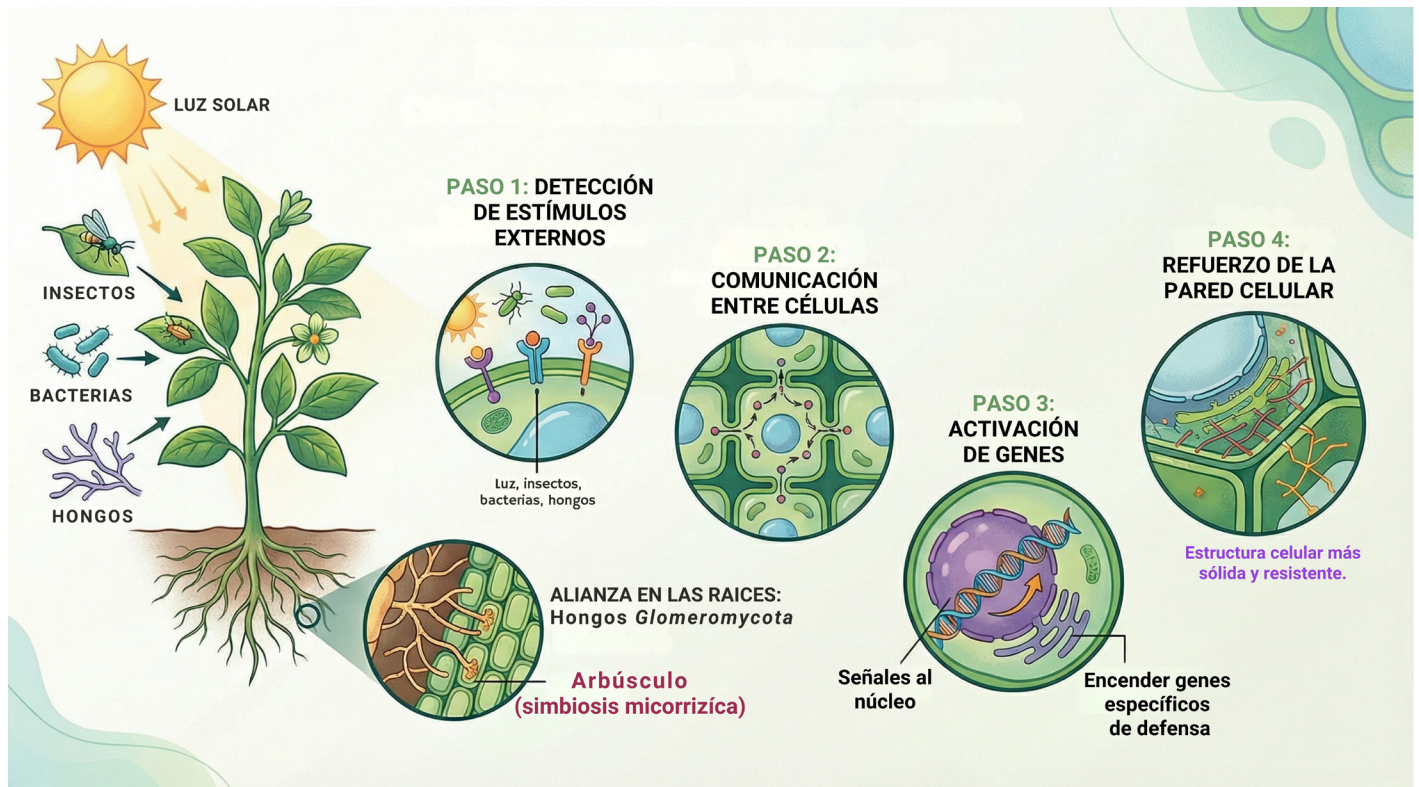


Figura 2. Representación esquemática del proceso de señalización molecular en plantas por estímulos ambientales (luz, bacterias, insectos y hongos), destacando la interacción con hongos micorrízicos arbusculares en la raíz y la formación de arbúsculos conduciendo al refuerzo de la pared celular vegetal.

planta, ya que el hongo capta nutrientes y agua del suelo y los transporta hasta los arbúsculos para que sean transferidos directamente a las células vegetales. Cuando el HMA es reconocido como un organismo benéfico, se generan señales celulares que viajan hasta el núcleo y activan genes específicos relacionados con la reorganización de la pared celular, el transporte de nutrientes y la adaptación al estrés (Fig. 2). Como resultado, la pared celular puede reforzarse, volverse más flexible o reorganizarse según las necesidades de la planta, preparándola para responder de manera más eficiente a diferentes condiciones ambientales.

El caso del tomate: un ejército especializado en las defensas celulares

Estudios en diversas plantas sugieren que, además de mejorar su nutrición, las plan-

tas en simbiosis micorrízica son menos vulnerables al ataque de microorganismos patógenos. La simbiosis micorrízica funciona como un sistema de alerta que prepara a la planta para defenderse ante patógenos y situaciones de estrés. Siguiendo la analogía militar, la micorriza arbuscular puede entenderse como un líder estratégico que coordina las defensas de la planta. Aunque no combate directamente, envía señales que alertan a las células y permiten reorganizar a los “soldados” de la pared celular, como los XyG, para fortalecer las defensas antes de que ocurra un ataque.

Cuando este sistema de alerta se activa, la planta pone en marcha un “equipo especializado” encargado de remodelar y reforzar la pared celular. Dentro de este equipo se encuentran las expansinas (EXPA), conocidas como “*las flexibilizadoras*”, que ayudan a relajar la pared celular; las xiloglucano endotransglucosidasa/hidrolasa (XTH), llamadas “*las*

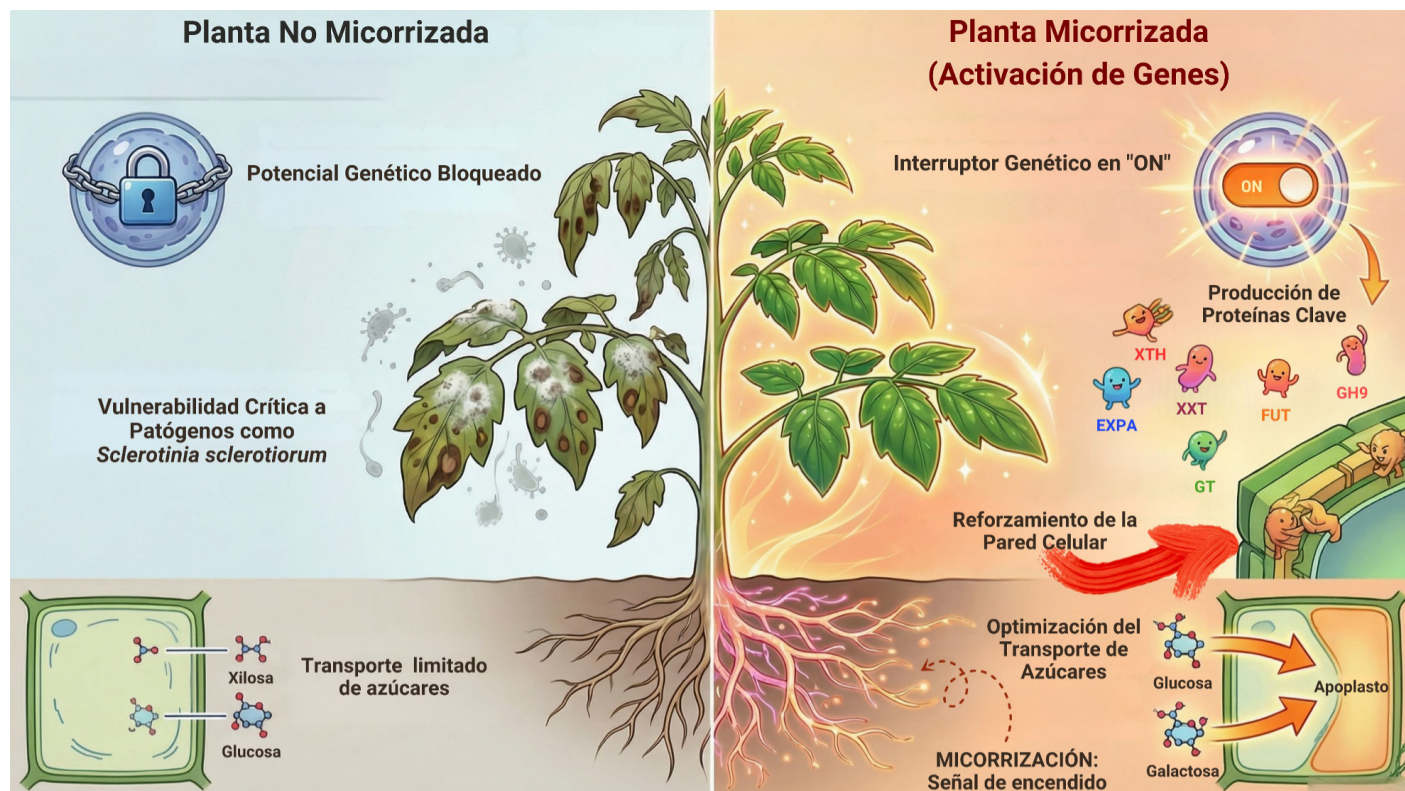


Figura 3. Modelo hipotético del mecanismo de la señalización celular y de la inducción transcripcional asociada a la remodelación de la pared celular por micorrización. En la figura se representa la inducción de la expresión génica y la activación de enzimas remodeladoras de la pared celular (EXPA, XTH, XXT, GH9, FUT y GT), asociadas a cambios en los componentes de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y pectina) y en la composición de azúcares (glucosa, xilosa, galactosa). Abreviaciones: XTH; xiloglucano endotransglucosidasa/hidrolasa, EXPA; expansina XXT; Xilosiltransferasas, GH9; glicosil hidrolasas de la familia 9, FUT; fucosiltransferasas y GT; galactosiltransferasas.

cortapega”, que cortan y reorganizan las cadenas de XyG; y las xilosiltransferasas (XXT), fucosiltransferasas (FUT) y galactosiltransferasas (GT), que funcionan como “*las constructoras*”, ya que ensamblan nuevos componentes de azúcares (xilosa, fucosa o galactosa) para fortalecer la pared celular (Fig. 3).

Por ejemplo, en el tomate, han sido detectadas modificaciones en las cadenas de azúcares que forman los XyG gracias a la acción de este equipo especializado[4,5]. Como resultado, en plantas micorrizadas, las cadenas de azúcares que forman parte de la pared celular vegetal se reorganizan y fortalecen, dificultando que los patógenos invadan e infecten la planta. En contraste, las plantas que no establecen asociaciones micorrízicas no presentan estos cambios estructurales y, por

lo tanto, carecen de este mecanismo adicional de protección (Fig. 3).

En conclusión, la micorrización no solo favorece una mejor nutrición y el crecimiento de las plantas, sino que también induce cambios estructurales que las ayudan a sobrevivir ante situaciones de estrés. La cooperación entre la planta y el hongo activa mecanismos de defensa, reorganiza a los “soldados” de la pared celular y prepara a la planta para enfrentar los desafíos de su entorno. Gracias a esta colaboración, las plantas responden de manera más eficiente al ataque de patógenos y a condiciones ambientales adversas. Comprender cómo funcionan estos mecanismos naturales de cooperación y defensa es fundamental para el desarrollo de una agricultura más sostenible.

Referencias

- [1] Cosgrove, D. J. (2022). Building an extensible cell wall. *Plant Physiology*, 189, 1246-1277. DOI: 10.1093/plphys/kiac184.
- [2] Tenhaken, R. (2015). Cell wall remodeling under abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1-9. DOI: 10.3389/fpls.2014.00771.
- [3] Pauly, M., & Keegstra, K. (2016). Biosynthesis of the plant cell wall matrix polysaccharide xyloglucan. *Annual Review of Plant Biology*, 67, 235-259. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043015-112222.
- [4] Sarmiento-López, L. G., López-Espinoza, M. Y., Juárez-Verdayes, M. A., & López-Meyer, M. (2023). Genome-wide characterization of the xyloglucan endotransglucosylase/hydrolase gene family in *Solanum lycopersicum* L. and gene expression analysis in response to arbuscular mycorrhizal symbiosis. *PeerJ*, 11, e15257. DOI: 10.7717/peerj.15257.
- [5] Bojórquez-Armenta, Y. d. J., Sarmiento-López, L. G., Pozo, M. J., Castro-Martínez, C., & López-Meyer, M. (2025). Characterization of endoglucanase (GH9) gene family in tomato and its expression in response to *Rhizoglyphus irregularis* and *Sclerotinia sclerotiorum*. *Plants*, 14(22), 3458. <https://doi.org/10.3390/plants14223458>