Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Quitosano en la agricultura: mecanismos de acción microbianos, inducción de defensas y bioestimulación vegetal

Chitosan in agriculture: microbial mechanisms of action, defense induction, and plant biostimulation

Jiménez-Pérez, O.[a], Gallegos-Morales, G.[b]*, Rivas-Martínez, E.N.[c], Soria-Delgado, S.[b]

[a] Agricultura Sustentable y Protegida, Universidad Tecnológica de Escuinapa, Camino al Guasimal S/N, Colonia Centro, Escuinapa de Hidalgo 82400, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1299-3607.

[b] Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9041-6904*, https://orcid.org/0009000334478459.

[c] Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7595-7638.

c_jimenezperez@hotmail.com; ggalmor@uaaan.edu.mx*; erika_rivas257@outlook.com; sam.soria.delgado@gmail.com

Innovación tecnológica: Bioalternativa en el control de fitopatógenos.
Área de aplicación industrial: Obtención de quitosano para la Agricultura.

Recibido: 16 junio 2025
Aceptado: 23 enero 2026

Abstract

Chitosan is a biopolymer derived from the deacetylation of chitin with notable applications in agriculture, such as the inhibition of phytopathogens, stimulation of beneficial microorganisms, biostimulant activity, and the ability to modulate the physiological responses of plants. These qualities are related to the concentration, percentage of deacetylation, and molecular weight of the biopolymer. Its interaction with microorganisms is related to the type of cell membrane they have. For example, microorganisms with highly fluid membranes (*Fusarium oxysporum* and *Neurospora crassa*) are sensitive to this compound, while those with low-fluidity membranes (*Beauveria bassiana* and *Pochonia chlamydosporia*) are tolerant. This biopolymer has direct effects on phytopathogenic fungi and bacteria by altering cell membrane permeability, interfering with cell wall synthesis, and chelating essential nutrients. Indirectly, it acts as a plant defense elicitor, inducing responses such as the production of reactive oxygen species and the activation of antioxidant and defensive enzymes. Likewise, the application of chitosan stimulates physiological processes in plants such as photosynthetic efficiency, ion absorption and homeostasis, and

tolerance to abiotic stress. Additionally, it interacts positively with beneficial microorganisms such as mycorrhizae, *Bradyrhizobium japonicum, Trichoderma spp.*, and *Bacillus spp*., promoting their colonization, metabolic activity, and synergistic effects on plant growth and health. This positions chitosan as a multifunctional tool for improving crop productivity, reducing the use of agrochemicals, and strengthening resilient and sustainable agriculture.

Keywords: Antimicrobial activity, Biostimulant, Biopolymer.

Resumen

El quitosano es un biopolímero derivado de la desacetilación de la quitina con aplicaciones destacadas en la agricultura como la inhibición de fitopatógenos, estimulación de microorganismos benéficos, bioestimulante y capacidad de modular las respuestas fisiológicas de las plantas. Dichas cualidades están relacionadas con la concentración, porcentaje de desacetilación y peso molecular del biopolímero. Su interacción con microorganismos está relacionada con el tipo de membrana celular que estos poseen, por ejemplo, microorganismos con membranas de alta fluidez (*Fusarium oxysporum* y *Neurospora crassa*) son sensibles a este compuesto, mientras que, los que presentan membranas de baja fluidez (*Beauveria bassiana* y *Pochonia chlamydosporia*) son tolerantes. Este biopolímero posee efectos directos sobre hongos y bacterias fitopatógenas mediante la alteración de la permeabilidad de la membrana celular, interferencia con la síntesis de la pared celular y la quelación de nutrientes esenciales. De forma indirecta, actúa como un elicitor de defensa vegetal, induciendo respuestas como la producción de especies reactivas de oxígeno, activación de enzimas antioxidantes y defensivas. Asimismo, la aplicación de quitosano estimula procesos fisiológicos de las plantas como la eficacia fotosintética, la absorción y homeostasis iónica, y la tolerancia a estrés abiótico. Adicionalmente, posee una interacción positiva con microorganismos benéficos como micorrizas, *Bradyrhizobium japonicum*, *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp. favoreciendo su colonización, actividad metabólica y efecto sinérgicos sobre el crecimiento y sanidad de las plantas. Lo anterior posiciona al quitosano como una herramienta multifuncional para mejorar la productividad de los cultivos, reducir el uso de agroquímicos y fortalecer una agricultura resiliente y sustentable.

Palabras clave: Actividad antimicrobiana, Bioestimulante, Biopolímero.

Introducción

El quitosano es un biopolímero lineal de unidades de [β-(1-4)-D-glucosamina] y en menor medida de N-acetil-D-glucosamina [β-(1-4)-N-acetil-D-glucosamina]) derivado de la desacetilación de la quitina (β-(1-4)-N-acetil-D-glucosamina), la cual, se encuentra en exoesqueletos de artrópodos y paredes celulares de los hongos (Jiménez-Mejia *et al*., 2018; Román-Doval *et al*., 2023). Para obtener quitosano la quitina debe de ser desacetilada a un porcentaje mayor al 50% (Román-Doval *et al*., 2023). Cuando se encuentra constituido solo de subunidades de 2-amino-2-desoxi-D-glucosmina se dice que este está completamente desacetilada (100% DD). A diferencia de la quitina, el quitosano es soluble en soluciones ácidas. Se divide en quitosano de bajo peso molecular (QBPM menos de 150 kDa), quitosano de mediano

peso molecular (QMPM de150-700 kDa) y quitosano de alto peso molecular (QAPM mayor a 700 kDa) (Román-Doval *et al*., 2023). Estas características son de gran importancia en su actividad biológica, ya que algunos autores mencionan que a mayor porcentaje DD y menor porcentaje de peso molecular (PM) este será más activo (Kulikov *et* al., 2006; Román-Doval *et al*., 2023). Sin embargo, esto aún no es del todo claro debido a que algunos otros autores señalan que la efectividad del QBPM es más baja que la del QAPM (Minh *et al*., 2020).

El peso molecular es de gran importancia ya que está relacionado con la solubilidad del polímero (Giraldo, 2015), por ejemplo, el QBPM presenta una mayor solubilidad y menor viscosidad que los QMPM y QAPM (Román-Doval *et al*., 2023), por estar constituido de cadenas más cortas, lo que lo hace que este se absorba más fácilmente (Thakur y Thakur 2014). Esta cualidad posiblemente tiene relación con una mayor actividad antimicrobiana, sin embargo, esto aún no está del todo confirmado, debido a que el quitosano está constituido también por algunas cadenas largas de D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina (Li *et al*., 2016). En lo que respecta al QMPM y QAPM estos son menos solubles que el QBPM (Li *et al*., 2010; Li *et al*., 2016; Yan *et al*., 2021).

Mecanismos de acción del quitosano sobre microorganismos fitopatógenos

El quitosano posee diferentes modos de acción en contra de fitopatógenos (Fig. 1). Las cargas positivas del quitosano (grupos aminoglucosamina) le permiten unirse a la pared celular de los fitopatógenos con cargas negativas (fosfolípidos en la membrana de hongos (Fig. 2), ácidos teicoicos en bacterias Gram^{+} (Fig. 4) y lipopolisacaridos en bacterias Gram^{-} (Fig. 3)), dicha unión afecta la permeabilidad y llega a ocasionar la lisis de la célula (Palma-Guerrero *et al*., 2010; Giraldo, 2015; Bautista-Baños *et al*., 2017; Ma *et al*., 2017; Elagamey *et al*., 2022). Goy *et al*. (2009), Garcia *et al*. (2018) y Yan *et al*. (2021) mencionan que el quitosano quelata nutrientes, el grupo amino del biopolímero (a pH alto) absorben cationes metálicos, debido a que los grupos aminos no están protonados y los dos electrones del nitrógeno (N_2) están disponibles para ser donados a los iones metálicos, lo que ocasiona desequilibrio homeostático iónico, causando la inanición de los microorganismos.

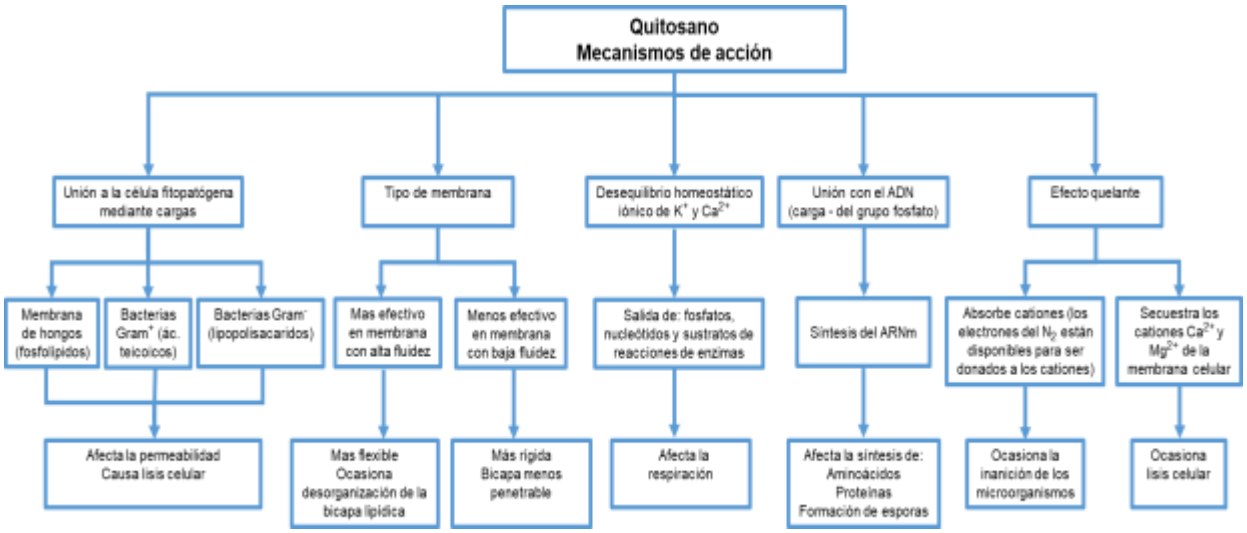


Figura 1. Mecanismos de acción del quitosano en contra de hongos y bacterias fitopatógenas.

Mecanismos de acción en contra de hongos fitopatógenos

El quitosano al poseer una gran cantidad de cargas positivas se une a la superficie de la célula del fitopatógeno (Bautista-Baños *et al*., 2017; Ke *et al*., 2021; Torres-Rodríguez *et al*., 2025). Una vez unido el quitosano penetra al interior de la célula, la penetración sobre la membrana plasmática dependerá de su composición, lo que se verá reflejado en su grado de fluidez (Palma-Guerrero *et al*., 2010; Gow *et al*., 2017; Bautista-Baños *et al*., 2017). Por ejemplo, el quitosano es más efectivo en hongos que poseen una membrana con alta fluidez, las cuales están constituidas por ácidos grasos poliinsaturados (ácido linoleico) y menos efectivo en aquellos que poseen membranas de baja fluidez compuestas por ácidos grasos saturados (ácido esteárico y palmítico) (Fig. 1). Lo anterior fue demostrado por Palma-Guerrero *et al*. (2010) al marcar el biopolímero con rodamina y ser aplicado a esporas de *Fusarium oxysporum* y *Neurospora crassa*, se pudo observar que estas se tiñeron de una fluorescencia rojiza, indicando que el biopolímero penetró en su interior al causar la permeabilización de la membrana plasmática, la cual presenta una alta fluidez. En contraste al ser comparadas con esporas de *Beauveria bassiana*, el cual presenta baja fluidez en su membrana, el quitosano no penetró, por consiguiente, no se apreció dicha coloración en su interior. Por su parte, Hosseinnejad y Jafari (2016), Bautista-Baños *et al*., (2017) y Torres-Rodríguez *et al*. (2025) mencionan que una vez dentro de la célula, el quitosano afecta al ADN en la síntesis de ARNm, esto debido a la interacción de las cargas positivas del biopolímero con las cargas negativas de los grupos fosfatos de la cadena de los ácidos nucleicos, lo que afecta la producción de proteínas y enzimas. Bautista-Baños *et al*. (2017) mencionan que la unión del quitosano con la célula fúngica ocasiona desequilibrio homeostático iónico de K^+ y Ca^2, lo que ocasiona la salida de pequeñas moléculas como fosfatos, nucleótidos y sustratos de reacciones de enzimas, dando como resultados la afectación de la respiración. Esto debido a que el quitosano compite con estos cationes por las cargas negativas de la pared celular (Giraldo, 2015) (Fig. 2). Asimismo, el biopolímero desencadena un incremento en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), las cuales inducen daño oxidativo que compromete el crecimiento micelial y suprime la germinación de esporas (Torres-Rodríguez *et al*., 2025).

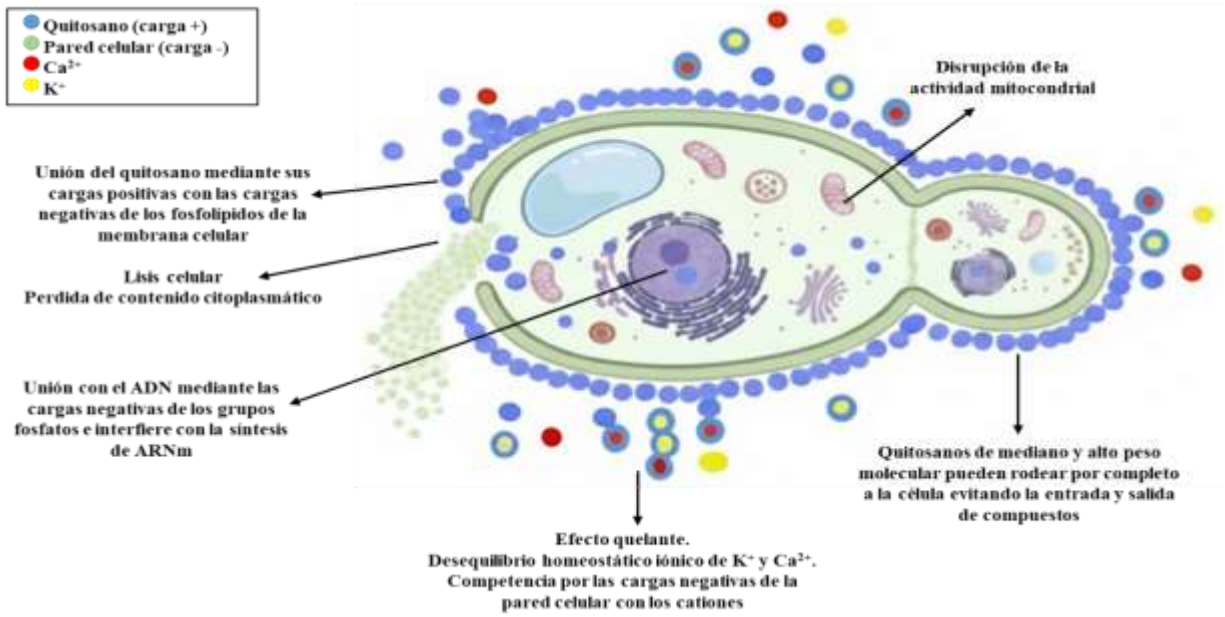


Figura 2. Mecanismos de acción del quitosano en la célula fúngica.

En *F. oxysporum* existen evidencias de que la aplicación de quitosano superiores a 1.6 mg/mL ocasionó malformaciones en el hongo, como ramificaciones excesivas, reducción del diámetro de las hifas, formación de vesículas y disolución del protoplasma (Al-Hetar *et al*., 2011). Por su parte Liu *et al*. (2012) observaron que la aplicación de 0.6 mg/mL de quitosano al 75% de desacetilación desintegro las hifas de *Rhizoctonia solani*. Otros investigadores señalan que la descomposición del quitosano libera amonio, el cual posee efecto fungistático (Velásquez *et al*., 2019) y bacteriostático (Rabea *et al*., 2003). Por su parte, Sánchez-Domínguez *et al*. (2007) observaron que *Alternaria alternata* tuvo menor desarrollo (39.4 mm) en medio de cultivo adicionado con 2% de quitosano de alto peso molecular (viscosidad >400 miliPascal por segundo) en comparación con el medio de cultivo sin quitosano (48.2 mm), resultando también en un efecto antifúngico. Attjioui *et al*. (2021) reportan una concentración inhibitoria mínima (concentración más baja que inhibe completamente el crecimiento fúngico "CMI") de 100 µg/mL^{-1} de quitosano para inhibir el crecimiento micelial de *Fusarium graminearum*. Además, menciona que las hifas del hongo presentaron deformaciones y descamación de la superficie, disminución de la germinación de las esporas y retraso de la elongación del tubo germinativo. De manera similar, Torres-Rodríguez *et al*. (2025) observaron que una concentración de 3 g/L^{-1} inhibió el 81.25% de crecimiento micelial de *Fusarium solani*, el cual presento deformación y crecimiento irregular del micelio y esporas, lisis celular y reducción de la esporulación.

Li *et al*., (2009) reportaron en ensayo *in vitro* que la eficacia antifúngica del quitosano al 0.5% tiene relación con el ácido utilizado para acidificar el medio de cultivo PDA. El quitosano disuelto en PDA acidificado (5.6 pH) con ácido latico (0.5 mol L^{-1}) redujo el crecimiento de *Fusarium sulphureum* a 5 mm de crecimiento micelial, mientras que en las formulaciones preparadas con ácido acético y ácido fórmico permitieron crecimientos de 12 y 50 mm respectivamente, indicando una menor inhibición.

Mecanismos de acción en contra de bacterias fitopatógenos

En el caso del efecto del quitosano en contra de bacterias Román-Doval *et al*. (2023) mencionan que la penetración de éste es más efectiva en bacterias Gram- (Fig. 3), que en bacterias Gram+, debido a la morfología de sus membranas (Fig. 4). En bacterias Gram- el polímero es atraído y se une a los lipopolisacaridos (Fig. 3), mientras que, en las Gram+ se une a los ácidos teicoicos (Fig. 4). Estos autores también señalan que el quitosano actúa sobre la membrana celular, ya que, una vez en contacto con ésta sustituye los iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} desplazándolos, ocasionando un aumento en la permeabilidad de la membrana, posteriormente, ocurre la disrupción de esta, y la salida del contenido celular. Añaden los autores que cuando el quitosano entra al interior de la célula se une al ADN e interfiere con la síntesis de ARN afectando la síntesis de proteínas, lo que ocasiona la muerte de la bacteria (Fig. 3 y 4).

Badawy *et al*., (2016) evaluaron la CMI de 11 quitosanos con distintos pesos moleculares (22 hasta 846 kDa) en contra de *Agrobacterium tumefaciens*, *Erwinia carotovora*, *Corynebacterium fascians* y *Pseudomonas solanacearum*, demostrando que a menor peso molecular aumenta el efecto de inhibición, ya que el quitosano de 22 kDa presentó CMI de 900, 850, 800 y 600 ml/L contra *C. fascians*, *E. carotovora*, *A. tumefaciens* y *P. solanacearum*, respectivamente. Mientras que quitosano de 846 kDa presento el menor efecto de inhibición, con CMI de 2600, 2100, 1300 y 1225 mg/L contra dichas bacterias, respectivamente. De forma similar, Wang *et al*., (2012) evaluaron el efecto inhibitorio de dos quitosanos (85 y 75% de desacetilación, respectivamente) a concentración de 0.1 mg/mL en contra de 12 cepas de *Xanthomonas*. Como resultados obtuvieron reducciones ópticas del crecimiento de dichas bacterias del 9.26 al 61.88% y 13.12 al 52.52%, respectivamente.

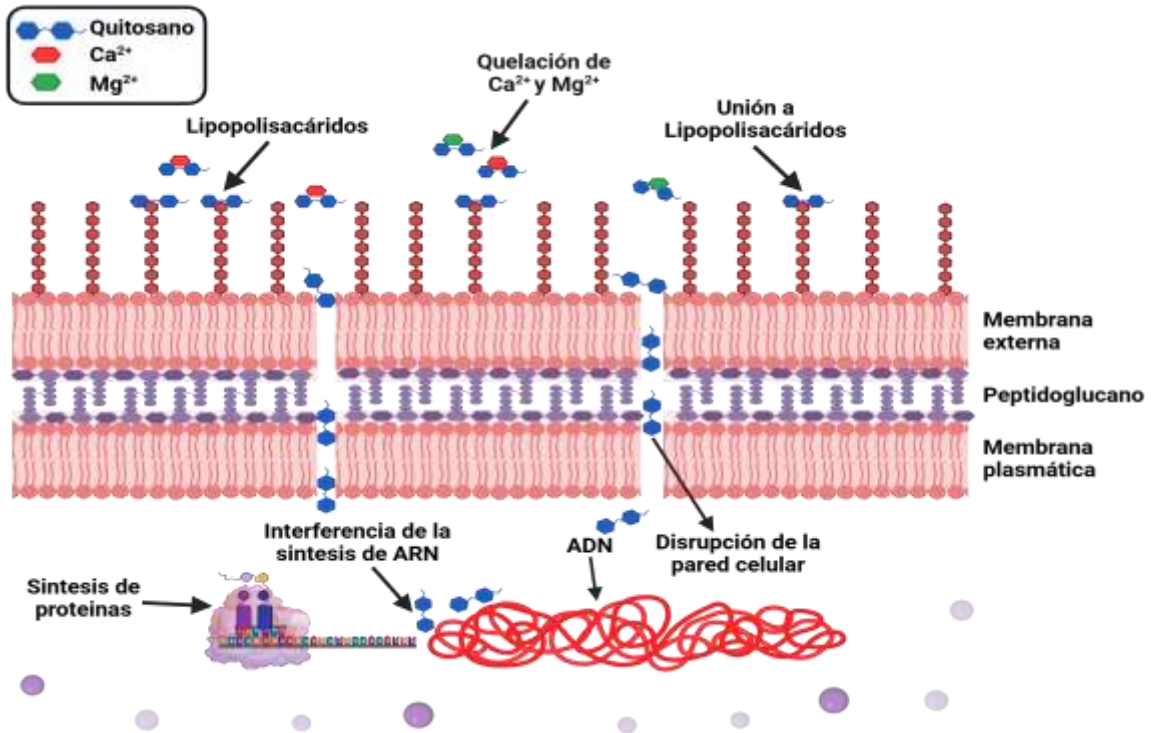


Figura 3. Interacción del quitosano con la pared celular, membrana plasmática, material genético y nutrientes en bacterias Gram negativas.

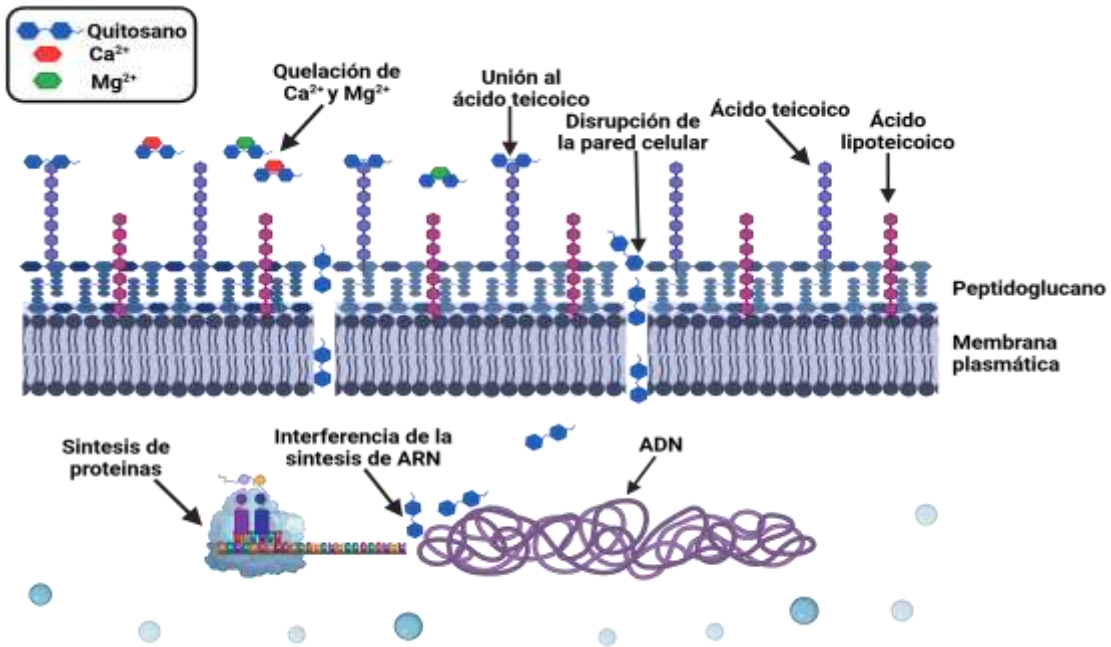


Figura 4. Interacción del quitosano con la pared celular, membrana plasmática, material genético y nutrientes en bacterias Gram positivas.

Efecto bioestimulante del quitosano en microorganismo benéficos

Algunos microorganismos benéficos presentan tolerancia al quitosano, esto gracias a que presentan una membrana celular de baja fluidez, debido a una mayor concentración de ácidos grasos saturados (ácido esteárico y palmítico) en su composición. Entre las especies que presentan estas características se conocen a los hongos entomopatógenos *B. bassiana* y *Pochonia chlamydosporia* (Palma-Guerrero *et al*., 2010). Otros hongos del género *Trichoderma* también presentan resistencia a este biopolímero (Zavala-González *et al*., 2016). Además, según otros autores este género contiene quitosano de manera natural en su pared celular, ya que, tienen la capacidad de producir quitinasas (*Chi*), por consiguiente, son menos sensible a este biopolímero (González *et al*., 2011; Hernández-Domínguez *et al*., 2021).

En trabajo realizado por Rautela *et al*. (2019) comprobaron que *Trichoderma asperellum* fue compatible con quitosano a 500 ppm y que al crecer en un medio suplementado con este biopolimero se indujo una mayor producción de *Chi*, además se sugirió que *T. asperellum* utiliza al quitosano como una fuente de nutriente. Escudero *et al*. (2017) también demostraron la compatibilidad de *P. chlamydosporia* con este biopolímero a concentración de hasta 2 mg mL^{-1} y que su crecimiento micelial fue mayor a dicha concentración. De manera similar, López *et al*. (2012) reportaron que residuos de quitina y quitosano estimularon en *T. asperellum* la expresión de genes quitinoliticos (*chit*42, *chit*33, *chit*37, *exc*1 y *exc*2), siendo esto favorable para la inhibición de fitopatógenos, ya que éstas fueron toxicas para *F. oxysporum*. Por su parte, Carrera (2017) demostró que quitosano de alto (812.69 kDa), mediano (381.84 kDa) y bajo (177.13 kDa) peso molecular para encapsular a *T. asperellum* a concentraciones de 0.10 y 0.25 %, se favoreció el desarrollo del hongo, presentando mayor crecimiento que *Trichoderma* sin encapsular. En el caso de micorrizas Gryndler *et al*. (2003) reportan

que la adición de quitina al sustrato de cultivo (arena) estimuló la colonización radicular, el crecimiento de micelio en las raíces y la producción de esporas de micorrizas de los géneros *Glomus mosseae*, *G. claroideum* y *G. geosporum* en plantas de puerro (*Allium ampelloprasum*), llanén (*Plantago lanceolata*) y lechuga (*Lactuca sativa*).

En trabajos realizados con bacterias Costales *et al*., (2017) demostraron que una concentración de 100 mg/mL de quitosano en el medio de cultivo incremento el número de unidades formadoras de colonias (UFC) de *Bradyrhizobium japonicum* (9×10^{10}) en comparación con el tratamiento testigo sin quitosano (8×10^{10}). Además, mencionan que la aplicación del quitosano en planta de soya favoreció la nodulación de las raíces por parte de la bacteria. Jiménez-Pérez *et al*., (2025) demostraron que concentraciones de 75 a 1200 ppm no afectan el crecimiento micelial *in vitro* de *Trichoderma harzianum* y que las concentraciones de 75 y 150 ppm favorecen su esporulación (1.5×10^8 y 5.2×10^8 esporas/mL) en comparación con el tratamiento testigo sin quitosano (1.2×10^8). Así mismo demostraron que concentraciones de 300 y 600 ppm estimularon una mayor reproducción de *Bacillus subtilis* con 2.8×10^9 y 3.1×10^9 UFC respectivamente, en comparación con el tratamiento testigo sin quitosano el cual presento 1.5×10^9 UFC.

Aplicación de quitosano en el control de enfermedades

Existen diversos estudios que demuestran el beneficio de la aplicación de quitosano en cultivos agrícolas, por ejemplo, Xoca-Orozco *et al*. (2018) mediante la aplicación de quitosano a frutos de aguacate infestados con una suspensión de esporas de *Colletotrichum* sp. (1x106 esporas/mL^{-1}), demostraron que estos presentaron una disminución del 80 y 95 % de la incidencia y severidad respectivamente, además, disminuyo la perdida de firmeza y peso. Esyanti *et al*. (2019) mediante la aplicación foliar de 200, 600 y 1000 $\mu g/mL^{-1}$ de quitosano en plantas de chile débilmente resistentes (LADO) y susceptibles (15080) lograron disminuir los niveles incidencia (0.5, 0.25, 0 y 0.35, 0.25, 0.1) y severidad (2.5, 1.5, 0 y 2, 1.25, 0.5) de *Phytophthora capsici* en comparación con el tratamiento sin quitosano que presento mayor incidencia (8 y 6.5) y severidad (3.5 y 3.25). De manera similar, López-Tobar *et al*. (2021) reportan que plantas de tomate tratadas con quitosano (300 mg/L^{-1}) de manera foliar presentaron menor incidencia (29.8%) y severidad (35.1%) de manchas foliares causadas por *Alternaria solani*, en comparación con el tratamiento sin quitosano, el cual presento 96.6 y 78.8% de incidencia y severidad, respectivamente. Por su parte, Elagamey *et al*. (2022) mencionan que una concentración de 0.6 mg/mL de quitosano en *F. oxysporum* f. sp. *cucumerinum* afectó la biosíntesis de proteínas estructurales y funcionales, la biosíntesis de ADN, a las proteínas transportadoras y la producción de enzimas que degradan la pared celular de la planta de pepino. Jiménez-Pérez *et al*. (2024) lograron una eficacia de control de *Leveillula taurica* en plantas de chile jalapeño del 70% mediante la aplicación de quitosano al 0.2%, el cual, fue superior a la aplicación de tebuconazol al 25% (1.8 mL/L de agua) el cual logró una eficacia de control del 50%. La aplicación de quitosano afectó la pared celular de las esporas, ocasionando la pérdida del contenido celular y desecación de estas, de forma similar a lo observado con la aplicación de tebuconazol.

Inducción de mecanismos de defensa de las plantas

El quitosano es un biopolímero con capacidad para ejercer efectos directos e indirectos en el control de fitopatógenos. En este sentido, De Bona *et al*. (2021) demostraron que la

aplicación de 1 gr/L de quitosano a hojas de vid redujo en un 43% el diámetro de las lesiones causadas por *Botrytis cinerea*. Asimismo, reportan un incremento significativo en la expresión de genes asociados a mecanismos de defensa a los 3 y 6 días después de la aplicación del biopolímero. Entre los genes inducidos se identificaron aquellos regulados por la vía del ácido jasmonico (JA) (JAZ1.1, LOX9 y LOX13), etileno (ET) (ACO), el factor de transcripción WRKY1, genes involucrados en la regulación redox (GST1). Adicionalmente, se observó la inducción de genes relacionados con la patogenicidad (PR5), la vía fenilpropanoide (PAL y STS) y un aumento en la acumulación de fitoalexinas, particularmente trans-resveratrol, lo que evidencia el papel del quitosano como inductor de mecanismos de defesa en la vid. De manera similar, Peian *et al*. (2020) demostraron que la aplicación de quitosano al 1% en frutos de uva y fresa inoculación con *B. cinerea*, detectaron un incremento en los genes relacionados con los mecanismos de defensa. Se observó una mayor expresión de genes asociados al JA (VvLOX, VvAOS, VvAOC, VvCOI1) y un incremento en los niveles de MeJA, la activación de las rutas del SA y ET. Asimismo, se detectó una estimulación de compuestos fenólicos (ácido cafeico y el ácido protocatecuico), flavonoides y ácido gálico. De manera concomitante, se registró un aumento de las enzimas fenilalanina amoniaco-liasa (PAL), peroxidasa (POD), la *Chi* y la ß-1,3-glucanasa (Gls). Además, se evidenció una mayor acumulación de otros compuestos como el estilbeno, lignina, así como indicadores de estrés oxidativo y señalización, como el malondialdehído (MDA) y ROS particularmente H_2O_2. En conjunto dichos cambios bioquímicos y moleculares contribuyeron a la inducción de resistencia en los frutos frente a la infección por *B. cinerea*. Por su parte, López-Moya *et al*. (2017) demostraron que la aplicación de quitosano a concentraciones de 0.1 a 1 mg/mL^{-1} en plantas de *Arabidopsis*, indujo la expresión de genes asociados a la resistencia sistémica adquirida (SAR) ((ácido salicílico (SA): isocorismato ICS1 e ICS2)) y a la resistencia sistémica adquirida (ISR) NPR1. Asimismo, estimulo genes claves en la biosíntesis del JA (AOC3, CYP94B, el factor de transcripción MYC2 y LOX3).

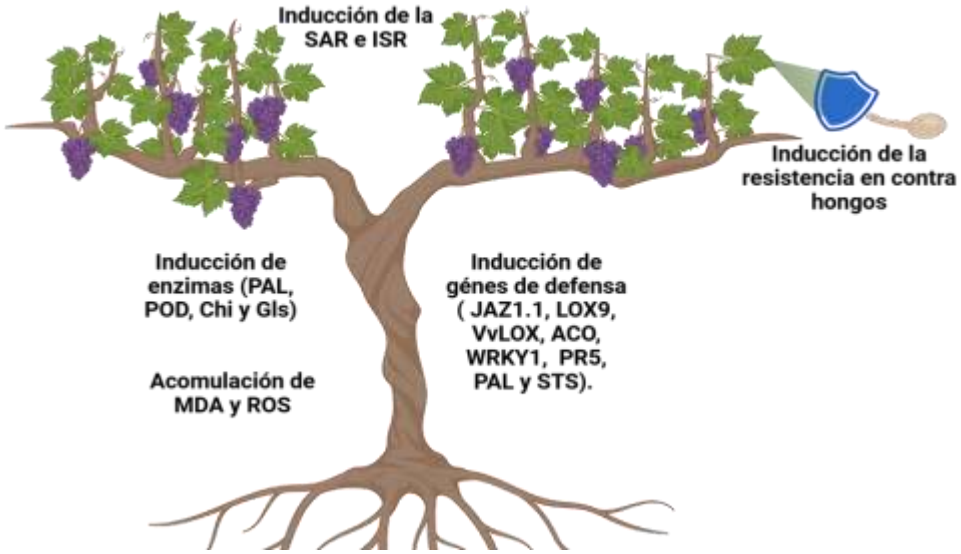


Figura 5. Efecto del quitosano en la inducción de mecanismos de defensa de las plantas.

Estimulación del crecimiento

Existen estudios que demuestran que el quitosano actúa como un bioestimulante del crecimiento vegetal o como un elicitor que protege a las plantas de las condiciones extremas, por ejemplo Attia *et al*., (2021) reportan que la aplicación foliar de quitosano (100 ppm), disuelto en una solución acidificada (pH 6) con ácido ascórbico o ácido cítrico, en plantas de tomate sometidas a estrés salino (NaCl 100 mM), mitigo el estrés oxidativo ya que disminuyo los niveles de malondialdehído (MDA) y H_2O_2, a su vez, incremento los niveles de isoenzimas peroxidasa (POD), superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y polifenol oxidasa (PPO). Además, promovió la acumulación de osmólitos (prolina, azucares y proteínas solubles), pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b y a+b) y carotenoides. En los tejidos de las plantas disminuyo los niveles de Na^+ y aumento la concentración de K^+. Dichos cambios fisiológicos y bioquímicos se tradujeron en un mayor crecimiento y desarrollo de las plantas (mayor número de hojas, número y tamaño de brotes y raíces) en comparación con las plantas no tratadas con quitosano. Por su parte Esyanti *et al*. (2019) reportan que el contenido de clorofila en hojas de chile fue mayor cuando se aplicaron de 200 a 600 $\mu g/mL^{-1}$ de quitosano. Mientras que a una concentración de 1000 $\mu g/mL^{-1}$ del biopolímero las plantas presentaron mayor número de hojas. De manera similar Holguin-Peña *et al*., (2020) al inocular semillas y plantas de sorgo (“Galio” ASGROW) con quitosano (100 y 50 %) en combinación con microorganismos promotores del crecimiento vegetal (*T. harzianum*, *T. reesei*, *B. subtilis*, *B. polymyxa* y *B. amyloliquefasciens* al 1×10^9 UFC/mL^{-1}). Promovió la germinación, incremento el índice de clorofila a+b (UnidadesSpad), así como el rendimiento y el contenido de proteína del grano, a un bajo esquema de fertilización reducida al 50%. Siendo estos resultados superiores que los tratamientos del biopolímero y microrganismo benéficos aplicados de forma individual, incluido el tratamiento donde se realizó una fertilización al 100%, lo que evidencia un efecto sinérgico entre el quitosano y los microorganismos benéficos en la mejora del desempeño agronómico del cultivo y en el ahorro de fertilizante.

Otros estudios son los realizados por, Reyes-Pérez *et al*. (2020) los cuales, al aplicar 2 g/L^{-1} de quitosano, indujeron una mayor germinación, fructificación, peso de frutos y rendimiento de tomate var. Floradade. López-Tobar *et al*. (2021) reportan que plantas de tomate tratadas con 300 mg/L^{-1} de quitosano, presentaron mayor longitud de raíz (28.61 cm), diámetro de tallo (12.21 mm) y rendimiento (39458.21 kg/ha) en comparación con el tratamiento sin quitosano (16.21 cm, 8.01 mm y 17562.33 kg/ha). Por su parte Reyes-Pérez *et al*. (2021) mediante la aplicación de quitosano a concentración de 3 g/L^{-1} en cultivo de pepino var. Inivit, lograron un mayor peso de frutos (306.5 g) y rendimiento (5703.7 kg/ha), en comparación con el tratamiento sin quitosano (248.5 g y 3581.2 kg/ha).

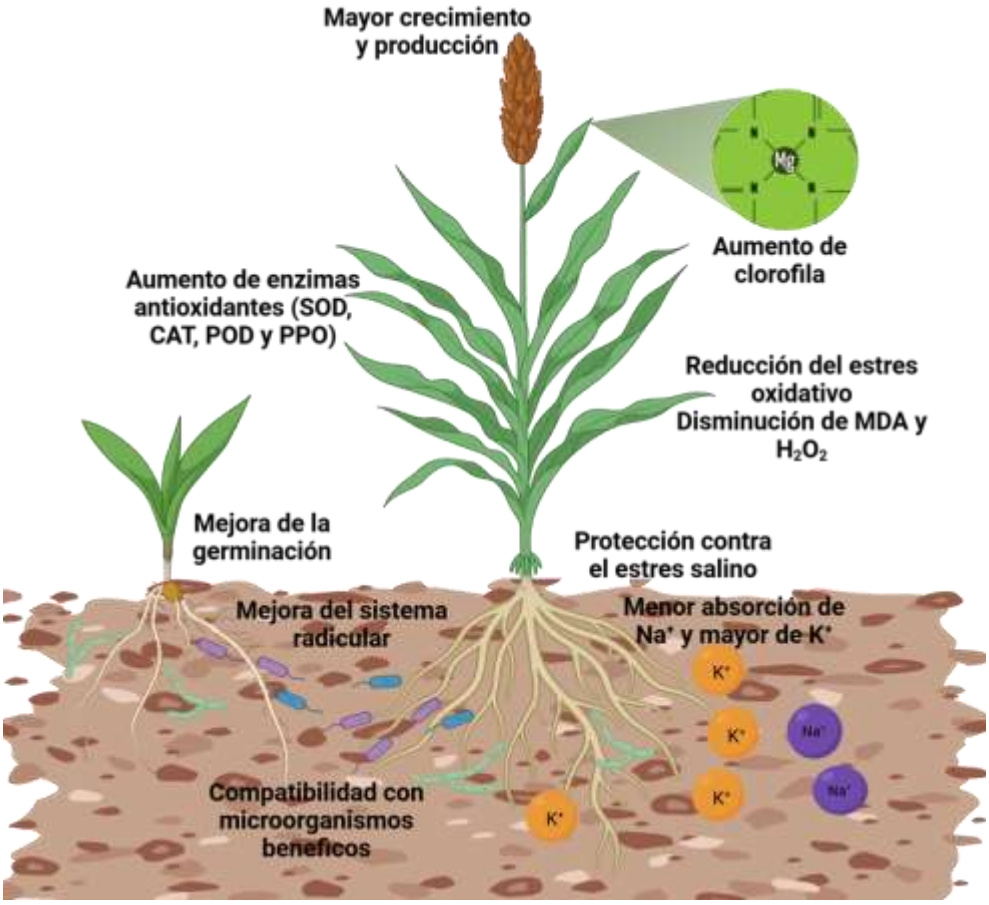


Figura 6. Efecto del quitosano sobre la inducción del crecimiento y desarrollo de las plantas.

Conclusiones

El quitosano es un biopolímero multifacético que integra efectos antimicrobianos directos, activación de mecanismos de defensa vegetal y estimulación del crecimiento de las plantas. Mejora la tolerancia de las plantas a estrés bióticos y abióticos al inducir respuestas antioxidantes, regular el balance redox y favorecer la homeostasis nutricional. Además, la sinergia entre el quitosano y microorganismos benéficos como micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp., refuerza su papel como modulador del microbioma rizosférico. En este contexto, el uso del quitosano representa una bioalternativa al uso de agroquímicos en la producción agrícola.

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica de Escuinapa y Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por el apoyo brindado para realizar el estudio.

Referencias

Attia, MS., Osman, MS., Mohamed, AS., Mahgoub, HA., Garada, MO., Abdelmouty, ES., & Abdel Latef, AAH. 2021. “Impact of Foliar Application of Chitosan Dissolved in Different Organic Acids on Isozymes, Protein Patterns and Physio-Biochemical Characteristics of Tomato Grown under Salinity Stress”. *Plants*, 10(2): 388. https://doi.org/10.3390/plants10020388

Attjioui, M., Gillet, D., El Gueddari, NE., and Moerschbacher, BM. 2021. “Synergistic Antimicrobial Effect of Chitosan Polymers and Oligomers”. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(7): 770-778. https://doi.org/10.1094/MPMI-07-20-0185-R

Al-Hetar, MY., Zainal Abidin, MA., Sariah, M., & Wong, MY. 2011. "Antifungal activity of chitosan against Fusarium oxysporumf. sp. Cubense". *Journal of Applied Polymer Science*, 120:2434-2439. https://doi.org/10.1002/app.33455

Badawy, Mohamed EI; Rabea, Entsar I.; Taktak, Nehad EM; El-Nouby, Mahmoud AM. 2016. "The Antibacterial Activity of Chitosan Products Blended with Monoterpenes and Their Biofilms against Plant Pathogenic Bacteria". *Scientifica*, 2016: 1-10. http://dx.doi.org/10.1155/2016/1796256

Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, RI., Correa-Pacheco, Z., & Corona-Rangel, ML. 2017. "Quitosano: un polisacárido antimicrobiano versátil para frutas y hortalizas en poscosecha - una revisión". *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 23(2): 103-122. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.11.030

Carrera, NLA. 2017. "Encapsulación de *Trichoderma asperellum* en partículas biopoliméricas con quitosanos de diferentes pesos moleculares para el control biológico de *Moniliophthora roreri*". *Universidad San Francisco de Quito, Tesis, Ingeniero Químico*. http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/6805

Costales, D., Nápoles, MC., Falcón, AB., González, AG., Ferreira, A., Rossi, A. 2017. "Influencia de quitosanas en la nodulación y el crecimiento vegetativo de soya (*Glycine max* L. Merrill)". *Cultivos Tropicales*, 38(1): 138–146. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000100018&lng=es&tlng=es

De Bona, GS., Vincenzi, S., De Marchi, F. Angelini, E., & Bertazzon, N. 2021. "Chitosan induces delayed grapevine defense mechanisms and protects grapevine against *Botrytis cinerea*". *Journal of Plant Diseases and Protection*, 128: 715–724. https://doi.org/10.1007/s41348-021-00432-3

Elagamey, E., Abdellatef, MA., & Arafat, MY. 2022. "Proteomic insights of chitosan mediated inhibition of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*". *Journal of Proteomics*, 260, 104560. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2022.104560

Esyanti, RR., Dwivany, FM., Mahani, S., Nugrahapraja H., & Meitha, K. 2019. "Foliar application of chitosan enhances growth and modulates expression of defense genes in chilli pepper (*Capsicum annuum* L.)". *Australian Journal of Crop Science*, 13(1): 55-60. https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.01.p1169

Escudero, N., Lopez-Moya, F., Ghahremani, Z., Zavala-Gonzalez, EA., Alaguero-Cordovilla, A., Ros-Ibañez, C., & Lopez-Llorca, LV. 2017. "Chitosan increases tomato root colonization by *Pochonia chlamydosporia* and their combination reduces root-knot nematode damage". *Frontiers in plant science*, 8, 1415. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01415

Garcia, L. G. S., de Melo Guedes, G. M., da Silva, M. L. Q., Castelo-Branco, D. S. C. M., Sidrim, J. J. C., de Aguiar Cordeiro, R., Gdelha R. M. F., Silveira, V. R. & Brilhante, R. S. N. 2018. "Effect of the molecular weight of chitosan on its antifungal activity against Candida spp. in planktonic cells and biofilm". *Carbohydrate Polymers*, 195: 662-669. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.091

Giraldo, J. 2015. "Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano". *Laboratorio de Biopolímeros*. https://doi.org./10.13140/RG.2.1.3350.9287

González, I., Infante, D., Peteira, B., Martínez, B., Arias, Y., González, N., & Miranda, L. 2011. "Caracterización

bioquímica de aislamientos de *Trichoderma* spp. promisorios como agentes de control biológico. ii. expresión de actividad glucanasa". *Revista de Protección Vegetal*, 26(1): 23-29. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522011000100004&lng=es&tlng=pt

Gow, NAR., Latge, JP., & Munro, CA. 2017. "The fungal cell wall: Structure, biosynthesis, and function". *Microbiology Spectrum*, 5(3): 5-3. https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0035-2016

Goy, RC., Britto, DD, & Assis, OB. (2009). A review of the antimicrobial activity of chitosan. Polímeros, 19: 241-247. https://doi.org/F10.1590/S0104-14282009000300013

Gryndler, M., Jansa, J., Hršelová, H., Chvátalová, I., Vosátka, M. 2003. "Chitin stimulates development and sporulation of arbuscular mycorrhizal fungi". *Applied Soil Ecology*, 22(3): 283–287. https://doi.org/10.1016/s0929-1393(02)00154-3

Hernández-Domínguez, C., Vázquez-Moreno, F., Cruz-Pantoja, AJ., Orduño-Cruz, N., Domínguez-Perales, LA., & Vázquez-Cruz, F. 2021. "Effect of Chitosan and Metabolites of *Trichoderma parareesei* on *Fusarium oxysorum* growth". *Revista Bio Ciencias*, e867. https://doi.org/10.15741/revbio.08.e867

Holguin-Peña, RJ., Vargas-López, JM., López-Ahumada, GA., Rodríguez-Félix, F., Borbón-Morales, CG., Rueda-Puente, EO. 2020. "Efecto de quitosano y consorcio simbiótico benéfico en el rendimiento de sorgo en la zona indígena "Mayos" en Sonora". *Terra Latinoamericana*, 38(3): 705-714. https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.669

Hosseinnejad, M., & Jafari, SM. 2016. "Evaluation of different factors affecting antimicrobial properties of chitosan". *International Journal of Biological Macromolecules*, 85: 467-475. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.022

Jiménez-Mejía, R., Arceo-Martínez, MT., & Loeza-Lara, PD. 2018. "Quitosano: actividad antimicrobiana y mecanismos de acción". *E-CUCBA*, (9): 17–23. https://doi.org/10.32870/e-cucba.v0i9.98

Jiménez-Pérez, O., Gallegos-Morales, G., Espinoza-Ahumada, CA., Delgado-Luna, C., Preciado-Rangel, P., & Espinosa-Palomeque, B. 2024. "Potential of Chitosan for the Control of Powdery Mildew (*Leveillula taurica* (Lév.) Arnaud) in a Jalapeño Pepper (*Capsicum annuum* L.) Cultivar". *Plants*, 13(7), 915. https://doi.org/10.3390/plants13070915

Jiménez-Pérez, O., Gallegos-Morales, G., Castro-del Ángel, E., Hernández-Castillo, FD., Castillo-Reyes, F. 2025. "Fungicidal activity of chitosan in synergy with *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis* for the control of chili wilt disease". *Agrociencia*. https://doi.org/10.47163/agrociencia.v59i1.3059

Ke, CL., Deng, FS., Chuang, CY., & Lin, CH. 2021. "Antimicrobial actions and applications of chitosan". *Polymers*, 13(6): 904. https://doi.org/10.3390/polym13060904

Kulikov, SN., Chirkov, SN., Il'ina, AV., Lopatin, SA., & Varlamov, VP. 2006. "Effect of the molecular weight of chitosan on its antiviral activity in plants". *Applied Biochemistry and Microbiology*, 42(2): 200-203. https://doi.org/10.1134/S0003683806020165

Li, YC., Sun, XJ., Bi, Y., Ge, YH., & Wang, Y. 2009. "Antifungal activity of Chitosan on

Fusarium sulphureum in relation to dry rot of potato tuber". *Agricultural Sciences in China*, 8: 597-604. https://doi.org/10.1016/S1671-2927(08)60251-5

Li, L., Deng, J., Deng, H., Liu, Z., & Li, X. 2010. "Preparation, characterization and antimicrobial activities of chitosan/Ag/ZnO blend films". *Chemical Engineering Journal*, 160: 378–382. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.051

Li, K., Xing, R., Liu, S., & Li, P. 2016. "Antibacterial activity and mechanism of chitosan with ultra high molecular weight". *Carbohydr Polym*. 139: 178-190. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.025

Liu, H., Tian, W., Li, y B. Wu, G., Ibrahim, M., Tao, Z., & Sun, G. 2012. "Antifungal effect and mechanism of chitosan against the rice sheath blight pathogen, *Rhizoctonia solani*". *Biotechnol Lett*, 34: 2291-2298. https://doi.org/10.1007/s10529-012-1035-z

Lopez-Moya, F., Escudero, N., Zavala-Gonzalez, EA., Esteve-Bruna, D., Blázquez, MA., Alabadí, D., & Lopez-Llorca, LV. 2017. "Induction of auxin biosynthesis and WOX5 repression mediate changes in root development in *Arabidopsis* exposed to chitosan". *Scientific Reports*, 7, 16813 (2017). https://doi.org/10.1038/s41598-017-16874-5

López, R., Blaya, J., Obiol, M., Ros, M., & Pascual, J. 2012. "Evaluation of the effect of chitin-rich rsidues on the chitinolytic activity of *Trichoderma harzianum*: *In vitro* and Greenhouse nursery experiments". *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 103: 1-8. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2012.02.001

López-Tobar, SF., Álvarez-Sánchez, AR., Reyes-Pérez, JJ., Vital-López, L., & Yanez-Cajo, DJ. 2021. "Respuesta agronómica y control fitosanitario de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L), a la aplicación de quitosano". *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(3): 6-12. https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/488

Ma, Z., Garrido-Maestu, A., & Jeong, KC. 2017. "Application, mode of action, and *in vivo* activity of chitosan and its microand nanoparticles as antimicrobial agents: A review". *Carbohydrate Polymers*. 176: 257-265. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.082

Minh, N., Van, HN., & Trung, T. 2020. "Preparation, properties, and application of low-molecular-weight chitosan". *Elsevier*, *In Handbook of Chitin and Chitosan*, 1(15): 453-464. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817970-3.00015-8

Palma-Guerrero, J., Lopez-Jimenez, JA., Pérez-Berná, AJ., Huang, IC., Jansson, HB., Salinas, J., & Lopez-Llorca, LV. 2010. "Membrane fluidity determines sensitivity of filamentous fungi to chitosan". *Molecular Microbiology*, 75(4): 1021-1032. https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2009.07039.x

Peian, Z., Haifeng, J., Peijie, G., Sadeghnezhad, E., Qianqian, P., Tianyu, D., Teng, L., Huanchun, J., Jinggui, F. 2020. "Chitosan induces jasmonic acid production leading to resistance of ripened fruit against *Botrytis cinerea* infection". *Food Chemistry*, 337, 127772. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127772

Rabea, EI., Badawy, MET., Stevens, CV., Smagghe, G., & Steurbaut, W. 2003. "Quitosano como agente antimicrobiano: aplicaciones y modo de acción". *Biomacromoléculas*, 4(6): 1457-1465. https://doi.org/10.1021/bm034130m

Rautela, A., Dwivedi, M., Tewari, AK., & Kumar, J. 2019. "Enzymatic activity and

secondary metabolite profile of Trichoderma asperellum in presence of chitosan". *Indian Phytopathology*, 72(3): 437- 444. https://doi.org/10.1007/s42360-019-00158-1

Reyes-Pérez, JJ., Rivero-Herrada, M., García-Bustamante, EL., Beltran-Morales, FA., & Ruiz-Espinoza, FH. 2020. "Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero". *Biotecnia*, 22(3): 156-163. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=672972612013

Reyes-Pérez, JJ., Rivero-Herrada, M., Andagoya-Fajardo, CJ., Beltrán-Morales, FA., Hernández-Montiel, LG., García Liscano, AE., & Ruiz-Espinoza, FH. 2021. "Emergencia y características agronómicas del *Cucumis sativus* a la aplicación de quitosano, *Glomus cubense* y ácidos húmicos". *Biotecnia*, 23(3): 38-44. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i3.1427

Román-Doval, R., Torres-Arellanes, SP., Tenorio-Barajas, AY., Gómez-Sánchez, A., & Valencia-Lazcano, AA. 2023. "Chitosan: Properties and Its Application in Agriculture in Context of Molecular Weight". *Polymers*, 15, 2867. https://doi.org/10.3390/polym15132867

Sánchez-Domínguez, D., Bautista-Baños, S., & Castillo-Ocampo, P. 2007. "Efecto del quitosano en el desarrollo y morfología de *Alternaria alternata* (fr.) Keissl". *Anales de Biología*, 29: 23-32. https://revistas.um.es/analesbio/article/view/40741

Thakur, V., & Thakur, M. 2014. "Recent Advances in Graft Copolymerization and Applications of Chitosan: A Review". ACS Sustainable Chemistry y Engineering, 2: 2637-2652. https://doi.org/10.1021/sc500634p

Torres-Rodríguez, JA, Reyes-Pérez, JJ, Carranza-Patiño, MS, Herrera-Feijoo, RJ, Preciado-Rangel, P., & Hernández-Montiel, LG. 2025. "Biocontrol de *Fusarium solani*: Actividad antifúngica del quitosano e inducción de enzimas de defensa". Plantas, 14(3): 431. https://doi.org/10.3390/plants14030431

Velásquez, CL., Pirela, ML., Chirinos, A., & Avelizapa, LI. 2019. "Nuevos retos en agricultura para los biopolìmeros de quitina y quitosano. Parte 1: efectos beneficiosos para los cultivos". *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 20(3): 118-136. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6996058

Wang, Y., Li, L., Li, B., Wu, G., Tang, Q., Ibrahim, M., Li, H., Xie, G., & Sun, G. 2012. "Action of Chitosan Against *Xanthomonas* Pathogenic Bacteria Isolated from *Euphorbia pulcherrima*. *Molecules*, 17(6): 7028-7041. https://doi.org/10.3390/molecules17067028

Xoca-Orozco, LA., Aguilera-Aguirre, S., López-García, UM., Gutiérrez-Martínez, P., Chacón-López, A. 2018. "Effect of chitosan on the *in vitro* control of *Colletotrichum* sp., and its influence on post-harvest quality in Hass avocado fruits". *Revista Bio Ciencias*, 5, e355. https://doi.org/10.15741/revbio.05.e355

Yan, D., Li, Y., Liu, Y., Li, N., Zhang, X., & Yan, C. 2021. "Antimicrobial properties of Chitosan and Chitosan derivatives in the treatment of enteric infections". *Molecules*, 26(23): 7136. https://doi.org/10.3390/molecules26237136

Zavala-González, EA., Lopez-Moya, F., Aranda-Martinez, A., Cruz-Valerio, M., Lopez-Llorca, LV., & Ramírez-Lepe, M. 2016. "Tolerance to chitosan by *Trichoderma* species is associated with low membrane fluidity". *Journal of Basic Microbiology*, 56(7): 792–800. https://doi.org/10.1002/jobm.201500758