

El quitosano: un aliado en el manejo de enfermedades en cultivos

Chitosan: an ally in plant diseases management

Quitosana: una aliada no manejo de doenças de plantas

José Alonso Calvo Araya

alonso.calvo.araya@una.cr

Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional, Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0001-7294-6426>

Alejandro Vargas Martínez

alejandro.vargas.martinez@una.ac.cr

Escuela de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional, Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0001-8039-8984>

Resumen

La utilización de biopolímeros como el quitosano en la agricultura es una alternativa eficiente y amigable en el manejo de enfermedades de cultivos, principalmente, desde un enfoque agroecológico y sostenibilidad donde hace uso de subproductos de la industria. Generalmente, la acción biocida está basada en inhibición de la germinación de los conidios de hongos, disrupción de la membrana celular de bacterias fitopatógenas, lo cual afecta la eclosión de huevos en nematodos fitoparásitos. Otros tipos de interacciones positivas que median en el control de fitopatógenos están en el crecimiento vegetal, inductor de resistencia en el hospedante, incremento de microorganismos degradadores de quitina en el suelo. En la siguiente revisión se aborda el concepto de quitosano, principales usos en el control de enfermedades, efecto sobre los principales grupos de microorganismos fitopatógenos, inducción de resistencia mediada por quitosano y nuevas

aplicaciones en la agricultura. Actualmente, se demuestra que el uso de sustancias alternativas como es el quitosano muestra un buen control de agentes patógenos de plantas y cada vez es mayor su aceptación y utilización dentro del manejo integrado de enfermedades de cultivos. Por lo cual, el objetivo de esta revisión es examinar los principales aspectos relacionados al quitosano y como este es utilizado para controlar ya sea directa o indirectamente los problemas fitosanitarios en los cultivos.

Palabras claves: Enfoque Agroecológico, Sostenibilidad en Subproductos de la Industria, Control de Enfermedades, Agentes Patógenos.

Abstract

The use of biopolymers such as chitosan in agriculture is an efficient and friendly alternative in the management of crop diseases, mainly from an agroecological and sustainability approach where it makes use of industry byproducts. Generally, the biocidal action is based on inhibition of the germination of fungal conidia, disruption of the cell membrane of phytopathogenic bacteria, affecting the hatching of eggs in phytoparasitic nematodes. Other types of positive interactions that mediate the control of phytopathogens are promotion of plant growth, inducer of resistance in the host, increase of chitin-degrading microorganisms in the soil. The following review addresses the concept of chitosan, main uses in disease control, effect on the main groups of phytopathogenic microorganisms, induction of resistance mediated by chitosan and new applications in agriculture. Currently, it is demonstrated that the use of alternative substances such as chitosan shows good control of plant pathogens and its acceptance and use within the integrated management of crop diseases is increasing. Therefore, the objective of this review is to examine the main aspects related to chitosan and how it is used to control, either directly or indirectly, phytosanitary problems in crops.

Keywords: Agroecological Approach, Sustainability in Industrial By-Products, Disease Control, Pathogenic Agents.

Resumo

A utilização de biopolímeros como a quitosana na agricultura é uma alternativa eficiente e amigável no manejo de doenças agrícolas, principalmente a partir de uma abordagem agroecológica e de sustentabilidade onde faz uso de subprodutos da indústria. Geralmente, a ação biocida baseia-se na inibição da germinação de conídios fúngicos, rompimento da membrana celular de bactérias fitopatogênicas, afetando a eclosão de ovos em nematóides fitoparasitas. Outros tipos de interações positivas que medeiam o controle de fitopatógenos são a promoção do crescimento das plantas, indutor de resistência no hospedeiro, aumento de microrganismos degradadores de quitina no solo. A revisão a seguir aborda o conceito de quitosana, principais usos no controle de doenças, efeito nos principais grupos de microrganismos fitopatogênicos, indução de resistência mediada pela quitosana e

novas aplicações na agricultura. Atualmente, está demonstrado que o uso de substâncias alternativas como a quitosana apresenta um bom controle de fitopatógenos e sua aceitação e utilização no manejo integrado de doenças agrícolas está aumentando. Portanto, o objetivo desta revisão é examinar os principais aspectos relacionados à quitosana e como ela é utilizada para controlar, direta ou indiretamente, problemas fitossanitários nas culturas.

Palavras-chave: Abordagem Agroecológica, Sustentabilidade em Subprodutos Industriais, Controle de Doenças, Patógenos.

Introducción

El manejo de enfermedades en los cultivos presenta retos cada vez más desafiantes como el cambio climático, rentabilidad, uso de la tierra, inestabilidad política y el crecimiento poblacional (Garrett, *et al.* 2018). Sumado a esto, el actual incremento en los costos de insumos agrícolas, aplicación excesiva de plaguicidas sintéticos que ha conllevado al desarrollo de resistencia por parte de los fitopatógenos, problemas de contaminación ambiental y restricciones en el uso de ciertos productos (Hasheminejad *et al.*, 2019).

En los últimos años ha surgido una preocupación por parte de los consumidores que demandan alimentos seguros para la salud humana y amigables con el ambiente (Rodríguez-Pedroso *et al.*, 2021). Además, los requisitos de comercialización son cada vez más estrictos en cuanto a los principios activos permitidos y los límites máximos de residuos en los alimentos (Romanazzi, *et al.*, 2018). Actualmente, las industrias optan por innovar mediante el uso de materias primas ecológicas, con propiedades equivalentes a las de los productos sintéticos, y que además conserven su funcionalidad (Palacios *et al.*, 2022).

Por muchos años se han utilizado plaguicidas sintéticos como principal estrategia de manejo de enfermedades, los cuales en su mayoría tienen un largo efecto residual en el suelo durante un gran periodo de tiempo (Sampathkumar *et al.*, 2020). Debido a lo anterior, es de vital importancia realizar una sustitución de estos

biocidas convencionales hacia la adopción e implementación de alternativas no químicas que permitan tener una buena protección de los cultivos.

El manejo de enfermedades tanto de suelo, como de partes aéreas en los cultivos es un reto de suma importancia. Se deben buscar productos que disminuyan las pérdidas económicas, con bajos efectos ambientales y de nulo impacto en la salud humana (Jeger *et al.*, 2021). Asimismo, la demanda por una población mundial cada vez más creciente, con exigencias en cuanto a calidad e inocuidad, con estimaciones para el año 2050 de 9000 millones de personas.

Dentro de los tres componentes que deben ser considerados para realizar un cambio en los métodos tradicionales de control están sociedad, económico y ecológico. Lo anterior es necesario para satisfacer la demanda de la población mundial y a la vez incrementar la producción, reducir la contaminación por micotoxinas, garantizar la diversidad y razonabilidad de alimentos en los mercados.

Se debe promover la utilización de diferentes insumos agrícolas que sustituyan el empleo de plaguicidas convencionales y permitan de manera directa e indirectamente contribuir a un manejo sostenible de enfermedades y por ende una disminución en la afectación de microorganismos fitopatógenos en los cultivos.

La siguiente revisión permitirá tener una visión general de la investigación sobre el uso de quitosano en la agricultura, específicamente, sobre enfermedades en cultivos y su impacto en la fitosanidad de los sistemas productivos.

Se recopila información actualizada sobre el quitosano desde una mirada fitosanitaria. Se considera la historia de su descubrimiento, la molécula *per se*, un resumen de las aplicaciones para el manejo de enfermedades en cultivos y la importancia de desarrollar productos amigables con la salud y el medio ambiente.

Metodología

Para la escritura de este artículo se realizó una revisión de documentación científica entre octubre y noviembre de 2022. Lo anterior, tuvo un enfoque sistémico: inicialmente, se consultaron bases de datos tales como Science Direct, Scopus y Web of Science. En cada una de las búsquedas realizadas se emplearon todas las combinaciones de dos grupos de palabras claves en el cual en el primer grupo: quitosano y en el segundo grupo las siguientes palabras enfermedades, manejo, fitopatógenos. Las escogencias de estas bases de datos se realizaron debido a que la Universidad Nacional (UNA) cuenta con suscripción a estas, asimismo de que cuentan con una gran cobertura de literatura científica relevante en temas agronómicos.

El manejo de información obtenida se realizó a través de la versión de prueba del software EndNote™20. Se recopilaron y seleccionaron artículos científicos relevantes en el tema de quitosano y el uso de este biopolímero en el manejo alternativo de enfermedades, lo cual constituyó el insumo para la redacción del presente artículo.

Desarrollo

El quitosano es un polisacárido natural, biodegradable, no tóxico y bioactivo, derivado de la quitina que se obtiene a partir del caparazón de los crustáceos (Bauer y Villegas 2022). El quitosano es el segundo biopolímero más abundante y posee características únicas de biodegradabilidad, no tóxico para humanos, lo que lo convierten en un excelente producto para diversos usos en la agricultura (Sreelatha *et al.*, 2022).

El quitosano resulta ser muy atractivo para la ciencia debido a su alta solubilidad en agua y facilidad para el proceso de derivatización. Estas propiedades le permiten a esta materia prima incursionar en múltiples aplicaciones: biomédica,

farmacéutica, agrícola y alimentaria (Romero & Pereira, 2020). Este polímero puede ser encapsulado en nanopartículas de diferentes ingredientes activos de fungicidas e insecticidas y se ha demostrado que la encapsulación en nanopartículas mejora la eficacia de los ingredientes activos, reduce su volatilización, disminuye la toxicidad y la contaminación ambiental (Kashyap, Xiang & Heiden. 2015).

Bauer y Villegas (2022) indican que los principales usos en la agricultura son los siguientes: promotor del crecimiento vegetal, agentes antimicrobianos para combatir fitopatógenos, y cubiertas de fertilizantes para su liberación controlada. Debido a su baja toxicidad, esta sustancia fue el primer compuesto en la lista de sustancias básicas aprobadas en la Unión Europea, con fines de protección de plantas para uso en agricultura orgánica y en manejo integrado de plagas (Romanazzi, Feliziani & Sivakumar, 2018). Algunas de las aplicaciones que tienen más auge en la actualidad es como preservante de alimentos, antihongos y antibacterial, fabricación de películas de empaque, recubrimiento de semillas y como agente floculante (Romero & Pereira, 2020).

En los años 90 se comenzó a utilizar el biopolímero en la agricultura, ya que presentaba características muy interesantes tales como antibacteriano, antifúngico y antiviral. Además, por su capacidad de retardar la liberación de los plaguicidas y fertilizantes (Palacios, *et al.* 2022).

Aplicaciones del quitosano para el manejo de fitopatógenos

Debido a la prohibición de muchos ingredientes activos presentes en los plaguicidas sintéticos utilizados para el control de enfermedades, los productos derivados del quitosano empezaron a ser utilizados en los últimos años para el control de enfermedades de cultivos y en tratamientos poscosecha (Yin & Du, 2011).

Por lo tanto, gracias a la alta actividad microbiana, biocompatibilidad, biodegradabilidad y no toxicidad del quitosano, se ha estudiado ampliamente durante las últimas décadas (Ma *et al.*, 2017). Este biopolímero se obtiene a partir de una materia prima fácil de adquirir, de bajo costo, de alto peso molecular y buen agente quelante (Montenegro, Vega & Hernández. 2019). El quitosano puede quelar varios compuestos orgánicos e inorgánicos, lo que lo hace muy adecuado para mejorar la estabilidad, la solubilidad y la actividad biocida de los fungicidas e insecticidas (Kashyap, Xiang & Heiden 2015).

Este biopolímero induce una producción de ácidos orgánicos, carbohidratos, aminoácidos y otros metabolitos para el ajuste osmótico, la señalización del estrés y el metabolismo energético (Hidangmayum *et al.*, 2019). Presenta triple acción al entrar en contacto con la planta: 1) activación de las defensas de la planta hospedante; 2) actividad antimicrobiana y 3) formación de una película sobre la superficie (Romanazzi, Feliziani & Sivakumar, 2018).

El quitosano puede afectar la expresión génica al generar cambios en la interacción con la cromatina, y, también, puede unirse a receptores específicos (Palacios *et al.*, 2022). Asimismo, puede inducir un gen de quinasa similar a un receptor (Hidangmayum, *et al.*, 2019). Este induce mecanismos de defensa en tejidos vegetales mediante la activación de genes de defensa (Guzmán, *et al.*, 2019).

Costales-Menéndez *et al.* (2021) concluyen que el quitosano estimula una respuesta defensiva en la planta e induce la acumulación de proteínas y modula los indicadores enzimáticos defensivos relacionados con la protección contra el ataque de patógenos. Esto implica una serie de cambios fisiológicos en la planta que puede afectar la expresión de diversos genes (Romanazzi, Feliziani & Sivakumar, 2018). De tal manera que aumenta los niveles de clorofila e induce actividad de enzimas implicadas en el metabolismo oxidativo como el superóxido dismutasa, la peroxidasa y la catalasa (Kashyap, Xiang & Heiden 2015). Además, induce la

producción de fluoroquinolonas, cumarinas y alcaloides (Kiran, Zainul, & Kamaluddin, 2020).

Plantas con estrés biótico sometidas a quitosano han mostrado respuesta de defensa, producción de fitoalexinas y proteínas relacionadas a la patogénesis, formación de callos, biosíntesis de lignina e inducción de genes de respuesta al estrés (Hidangmayum, *et al.*, 2019).

Actividad antifúngica

Se ha reportado la capacidad del quitosano para afectar varios estadios del desarrollo de los hongos (Rodríguez, *et al.*, 2021). Además, inhibe el crecimiento micelial (Valle, *et al.*, 2021) al interactuar con las membranas fúngicas produciendo permeabilización, pérdida de proteínas y aminoácidos (Cortés, *et al.*, 2021). Dicha actividad antifúngica depende de la masa molecular, el grado de concentración y de acetilación al que se encuentre el quitosano (Rodríguez, *et al.*, 2021).

Un estudio sobre el efecto del quitosano sobre *Curvularia lunata* a diferentes masas moleculares indica que el porcentaje de inhibición sobre el hongo fue significativamente mayor a medida que aumentaba la concentración (Valle, *et al.* 2021).

El quitosano despolariza la membrana plasmática de las raíces de las plantas e incrementa las especies reactivas del oxígeno (ROS) en plantas. Esto está ligado a un incremento en la secreción del ácido jasmónico y otros compuestos en los exudados radiculares (Suarez-Fernández *et al.*, 2020). Además, permeabiliza la membrana de hongos fitopatógenos (Palma-Guerrero *et al.*, 2010).

La aplicación de nanopartículas de quitosano en poscosecha han dado buenos resultados para evitar problemas relacionados con procesos de maduración y enfermedades poscosechas (Esyanti *et al.*, 2019).

Actividad nematocida

Los métodos de control tradicionales para el manejo de nematodos fitoparásitos han sido los nematocidas químicos, sin embargo, estos son altamente tóxicos para las personas, presentan alta residualidad, problemas de resistencia y contaminación ambiental.

El quitosano actúa como un elicitador que contribuye en la resistencia local e inducida contra el nematodo agallador *M. incognita* en el cultivo de tomate (Radwan *et al.*, 2012). En este mismo sentido Zinoveva *et al.* (1999) encontraron que aplicaciones de quitosano activaron el sistema de resistencia de plantas de tomate por medio del incremento de la acción lipoxigenasa, lo cual redujo la invasión.

Aplicaciones vía Drench de nanopartículas de quitosano suprimieron las poblaciones de J2 en el suelo en un 64,50 y el agallamiento radicular se redujo en un 67,87 y 56,40 % pre y posinfección, respectivamente (Khalil *et al.*, 2022).

Aplicaciones de quitosano al 4,4 % incrementaron la tolerancia de *Pinus pinaster* a *Bursaphelenchus xylophilus*, lo cual resultó en una disminución de la densidad poblacional del nematodo, incremento de la acumulación de metabolitos involucrados en actividad antioxidante, incremento de la expresión diferencial de genes para tolerancia al estrés (Nunes da Silva *et al.*, 2021). El quitosano a una concentración de 0,25 % mostraron para el control de *A. besseyi* en el cultivo de arroz (Ibrahim y Kurniawati 2020).

Quitosano a concentraciones de 0,5 %, 1 % y 2 % redujeron el número de agallas y la densidad poblacional de J2 en el suelo, donde la concentración más efectiva fue la del 2,0 % en condiciones *in vitro* con un efecto nematocida y reduciendo la eclosión y mortalidad sobre J2 en más de un 70 % (Göze *et al.*, 2022).

Actividad antibacteriana

Diversos estudios han confirmado la acción del quitosano contra una amplia gama de patógenos que afectan los cultivos (Valle, *et al.*, 2021). Este compuesto es antimicrobiano por su acción bactericida y fungicida en el crecimiento y desarrollo de bacterias, hongos y oomycetes. La inhibición de dichas especies de microorganismos patógenos depende del grado de desacetilación, el pH, los cationes divalentes y el tipo de solvente (Zhang, *et al.*, 2022).

La actividad antimicrobiana es de sus principales aplicaciones y este depende de la concentración a la que se utilice (Romanazzi, Feliziani & Sivakumar, 2018). Además, penetra las membranas celulares, fácilmente, e inhibe el crecimiento bacteriano al inhibir el ARN de transcripción (Zhang, *et al.*, 2022).

Sampathkumar, Xian, & Joachim (2020) indican que existe un efecto sinérgico cuando se utiliza los aceites esenciales con propiedades antibacterianas como el del tomillo y canela en combinación con quitosano vía encapsulación.

Estudios realizados Wang *et al.* (2012) demuestran la efectividad del quitosano contra la bacteria *Xanthomonas*. Este efecto antagonista estuvo relacionado, principalmente, en el daño causado a la membrana de la célula. Asimismo, nanopartículas de quitosano cargadas con el aceite esencial de tomillo, principalmente, contra bacterias fitopatógenas de suelo (Pecarski *et al.*, 2014).

Aplicaciones de nanopartículas de quitosano con timol presentan actividades bactericidas contra *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*; reduce su crecimiento, viabilidad celular y la reducción del pigmento xanthomonadina. Lo anterior debido, principalmente, a la interrupción de la integridad de la membrana celular (Sreelatha *et al.*, 2022).

Uso como protectante

Actualmente, el quitosano es utilizado como parte de recubrimientos comestibles para preservar la calidad de frutas y verduras poscosecha (Sampathkumar, Xian, & Joachim. 2020) y extender su vida útil sin producir cambios en las propiedades organolépticas y nutricionales de los alimentos sometidos a esta recubierta (Phuoc *et al.*, 2019).

De tal manera que se puede aplicar en la superficie de la planta por inmersión o rociado. Este compuesto es comestible y su espesor, viscosidad y permeabilidad dependen, mayoritariamente, del ácido en que se disuelva. Esta película formada sobre la superficie funciona como bloqueador de intercambio de gases; lo que retrasa la maduración de la fruta poscosecha (Romanazzi, Feliziani & Sivakumar, 2018).

El quitosano actúa como un elicitador exógeno para frutas y verduras, para inducir la resistencia del huésped contra los patógenos (Zhou, Zhang & Zeng. 2016). También, es importante tomar en cuenta que el quitosano, al tener este efecto elicitador, puede aumentar la permeabilidad celular y el aumento de la permeabilidad de las membranas vegetales a menudo se ha relacionado con la pérdida de viabilidad de las células vegetales (Kiran, U. Zainul, M. & Kamaluddin, 2020).

Además, en situaciones de sequía, las aplicaciones con quitosano inducen el cierre de la estoma, a través de la síntesis de ABA, lo cual reduce la transpiración y mantiene la humedad en la planta (Palacios, *et al.*, 2022. & Hidangmayum, *et al.*, 2019).

Conclusiones

En conclusión, el quitosano constituye una herramienta con gran potencial para ser utilizada en el manejo de enfermedades de los cultivos tanto en campo abierto, como en invernadero. Sin embargo, para hacer un uso eficiente de este biopolímero

es indispensable tomar en cuenta aspectos como el material de origen, formulación y formas de aplicación. También, se ha visto que la combinación del quitosano con otros productos alternativos para el control de enfermedades como extractos botánicos, biofertilizantes, biocontroladores potencian el efecto de control ejercido sobre los microorganismos fitopatógenos. Adicionalmente, al efecto antagónico el quitosano favorece el crecimiento de microorganismos en el suelo que pueden actuar como reguladores naturales. De tal manera que existe una gran diversidad de usos y formulaciones según criterios científicos con el objetivo de utilizar este biopolímero de manera eficiente para la fitoprotección.

Referencias

Bauer, J. Villegas, L. & Zucchetti, A. (2022) Applications of chitosan in agriculture, industry, and health. South Florida Journal of Environmental and Animal Science. Miami.

Cortés-Rivera H., González-Estrada R., Huerta-Ocampo J. (2021). Evaluation of commercial chitosan and aqueous extracts of coconut shell (*Cocos nucifera* L.) for the control of *Rhizopus stolonifer* isolated from soursop (*Annona muricata* L.): In vitro tests. TIP Rev Esp Cienc Quim Biol. 24(1).

Costales-Menéndez, M; Falcón-Rodríguez, A; Nápoles-García, M; Cabrera-Pino, J; Varela-Nualles, M; Travieso-Hernández, I. 2021. Quitosano induce respuestas defensivas en plantas de soya inoculada con *Bradyrhizobium elkanii*. Cultivos Tropicales, 42(2), e07

Esyanti, R. R., Dwivany, S., Mahani, H., Nugrahapraja and K. Meitha. (2019). Foliar application of chitosan enhances growth and modulates expression of defense genes in chilli pepper (*Capsicum annum* L.). Aust. J. Crop Sci. 13: 55–60.

Garrett, K. A., Alcalá-Briseño, R. I., Andersen, K. F., Buddenhagen, C. E., Choudhury, R. A., Fulton, J. C., Hernandez Nopsa, J. F., Poudel, R., & Xing, Y. (2018). Network Analysis: A Systems Framework to Address Grand Challenges in Plant Pathology. Annual review of phytopathology, 56, 559–580. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035326>

Göze Özdemir, F. G., Çevik, H., Ndayiragije, J. C., Özek, T. & Karaca, İ. (2022). Nematicidal effect of chitosan on *Meloidogyne incognita* in vitro and on tomato in a

pot experiment. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 6 (3), 410-416. DOI: 10.31015/jaefs.2022.3.10

Hasheminejad N., Khodaiyan F., Safari M., 2019, Improving the antifungal activity of clove essential oil encapsulated by chitosan nanoparticles, *Food Chemistry*, 275, 113-122.

Hidangmayum, A., Dwivedi, P., Katiyar, D., & Hemantaranjan, A. (2019). Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. *Physiology and molecular biology of plants: an international journal of functional plant biology*, 25(2), 313-326. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0633-1>

Ibrahim, A. & Kurniawati, F. (2020). Southeast Asia Plant Protection Conference. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 468 (2020) 012025. doi:10.1088/1755-1315/468/1/012025

Jeger, M., Beresford, R., Bock, C. (2021). Global challenges facing plant pathology: multidisciplinary approaches to meet the food security and environmental challenges in the mid-twenty-first century. *CABI Agric Biosci* 2(20).

Kaarunya, S., Kei Xian, T., Say Chye Joachim, L. (2020). Developing Nano-Delivery Systems for Agriculture and Food Applications with Nature-Derived Polymers. *iScience* 23(1).

Kashyap, P. L., Xiang, X., & Heiden, P. (2015). Chitosan nanoparticle-based delivery systems for sustainable agriculture. *International journal of biological macromolecules*, 77, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.02.039>

Khalil, M.S., Abd El-Aziz, M.H. & Selim, R. (2022) Physiological and morphological response of tomato plants to nano-chitosan used against bio-stress induced by root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) and Tobacco mosaic tobamovirus (TMV). *Eur J Plant Pathol* 163, 799-812. <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02516-8>

Ma Z, Garrido-Maestu A, Jeong KC (2017) Application, mode of action, and in vivo activity of chitosan and its micro- and nanoparticles as antimicrobial agents: A review. *Carbohydr Polym* 176:257- 265. doi: 10.1016/j.carbpol.2017.08.082

Montenegro, H., Vega, D., & Hernández, A. (2019) Preparation and characterization of some derivatives of chitosan. *Scientia, Revista de Investigación*.

Nunes da Silva, M., Santos, C.S., Cruz, A. (2021). Chitosan increases *Pinus pinaster* tolerance to the pinewood nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) by

promoting plant antioxidative metabolism. *Sci Rep* 11, 3781. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83445-0>

Palacios, A., Ramírez, C., Sánchez, E., Ojeda, D., Chávez, C., Sida, J. & Preciado, P. (2022). Use of biostimulant compounds in agriculture: chitosan as a sustainable option for plant development. *Notulae Scientia Biologicae*. Vol. 14. México.

Palma-Guerrero, J., Larriba, E., Güerri-Agulló, B., Jansson, H. B., Salinas, J., & Lopez-Llorca, L. V. (2010). Chitosan increases conidiation in fungal pathogens of invertebrates. *Applied microbiology and biotechnology*, 87(6), 2237–2245. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2693-1>

Pecarski D., Knežević-Jugović Z., Dimitrijević-Branković S., Mihajilovski K., Janković S. (2014). Preparation, characterization and antimicrobial activity of chitosan microparticles with thyme essential oil. *Hem. Ind.* 68, 721–729. doi: 10.2298/HEMIND140415048P

Phuoc, N., Thinh, V., Van, T., Thanh, T., & Kim, D. (2019). Application of Guar Gum as Edible Coating to Prolong Shelf Life of Red Chilli Pepper (*Capsicum frutescens* L.) Fruit during Preservation. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 11(4), 1474–1478.

Radwan M.A., Farrag S., Abuelamayem M.M., Nabila S., Ahmed N.S. (2012). Extraction, characterization and nematicidal activity of chitin and chitosan derived from shrimp shell waste. *Biol Fertil Soils*. 48:463–468. doi:10.1007/s00374-011-0632-7.

Rodríguez-Pedroso A.T., Plascencia-Jatomea M., Bautista-Baños S., Ventura-Zapata E., Cortez-Rocha M.O., Ramírez Arrebato M.A. (2021) Efecto in vitro de un quitosano de masa molecular media sobre dos cepas de *Bipolaris oryzae* aisladas en México y Cuba. *Biotechnol Apl.* 38(2), 2201-5.

Rodríguez-Guzmán, Carlos A., González-Estrada, Ramsés R., Bautista-Baños, S. y Gutiérrez-Martínez, P. (2019). Efecto del quitosano en el control de *Alternaria* sp. en plantas de jitomate en invernadero. *TIP Rev.Esp.Cienc.Quím.Biol.*

Romanazzi, G., Feliziani, E., & Sivakumar, D. (2018) Chitosan, a Biopolymer with Triple Action on Postharvest Decay of Fruit and Vegetables: Eliciting, Antimicrobial and Film Forming Properties. *Frontiers in Microbiology*. Wuhan University, China

Romero, A. & Pereira, J. (2020). Review: Chitosan, a versatile biomaterial. State of the art from its obtaining to its multiple applications. *Revista Ingeniería UC*. Vol 2. Universidad de Corabobo.

Sarangapani, S., Patil, A., Ngeow, Y. K., Elsa Mohan, R., Asundi, A., & Lang, M. J. (2018). Chitosan nanoparticles' functionality as redox active drugs through cytotoxicity, radical scavenging, and cellular behaviour. *Integrative biology: quantitative biosciences from nano to macro*, 10(5), 313–324.

Sampathkumar, K., Xian, K. & Joachim, D. (2020) Developing nano-delivery systems for agriculture and food applications with nature-derived polymers. *Isience*. Vol. 23.

Sreelatha, S., Kumar, N., Si Yin, T., Rajani, S. (2022). Evaluating the Antibacterial Activity and Mode of Action of Thymol-Loaded Chitosan Nanoparticles Against Plant Bacterial Pathogen *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. *Front. Microbiol.* 12:792737.

Suárez-Fernández M., Marhuenda-Egea F. C., López-Moya F., Arnao M. B., Cabrera-Escribano F., Nueda M. (2020). Chitosan induces plant hormones and defenses in tomato root exudates. *Front Plant Sci* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.572087>

Usha K. Abdin M. Z. & Kamaluddin K. (2020). Transgenic technology-based value addition in plant biotechnology. Academic Press

Valle, Y., Rodríguez, A., Ramírez, M., Reyes, J., Hernández, L. & Cruz, R. (2021) Effect of chitosans of different molecular masses on the fungus *Curvularia lunata*. *Biotechnología Aplicada*. Vol.38, No.4

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* (Basel, Switzerland), 17(6), 7028–7041. <https://doi.org/10.3390/molecules17067028>

Yin, H. & Du, Y. (2011) Chapter 41: Mechanism and application of chitin/chitosan and their derivatives in plant protection. In: Kim SK (ed) *Chitin, chitosan, oligosaccharides and their derivatives: biological activities and applications*. CRC Press/Taylor & Francis Group LLC, Boca Raton, pp605–618. ISBN 9781439816035.

Zhang, M., Zhang, F., Li, C., An, H., Wan, T., & Zhang, P. (2022). Application of Chitosan and Its Derivative Polymers in Clinical Medicine and Agriculture. *Polymers*, 14(5), 958.

Zhou, Y., Zhang, L. & Kaifang, Z. (2016). Efficacy of *Pichia membranaefaciens* combined with chitosan against *Colletotrichum gloeosporioides* in citrus fruits and

possible modes of action. *Biol Control* 96:39–47. doi:
10.1016/j.biocontrol.2016.02.001.

Zinoveva S.V., Vasyukova N.I., Inskaya L.I., Varlamov V.P., Ozeretskoy O.L., Sonin M.D. (1999). Effect of chitosan on interactions in a plant parasitic nematodes system. *Doklady, Biological Sciences*. Enterperiodical Publishing, Moscow. 367:400–402.

PREPRINT