

Efecto bioestimulante de nanopartículas de titanatos de hidrógeno con quitosano en frijol Frailescano

Edwin Giuliani Roblero-Torres¹

Verónica Castro-Velázquez²

Vicente Rodríguez-González²

Magín González-MoscOSO^{1,§}

1 Departamento de Nanotecnología-Universidad Politécnica de Chiapas. Carretera Tuxtla Gutiérrez-Porti llo Zaragoza km 21+500, Colonia Las Brisas Suchiapa, Chiapas, México. CP. 29150.

2 División de Materiales Avanzados-Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Camino a la Presa de San José 2055, San Luis Potosí, México. CP. 78216.

[§]Autor para correspondencia: mgonzalez@in.upchiapas.edu.mx.

Resumen

El uso excesivo de fertilizantes y agroquímicos en la agricultura ha ocasionado un deterioro ambiental. En este contexto, la nanotecnología emerge como una alternativa sostenible para la agricultura moderna. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto bioestimulante de compuestos formados por nanopartículas de titanatos de hidrógeno y biopolímero de quitosano, en formulaciones con 10 y 90% de quitosano en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), variedad Frailescano, bajo condiciones de invernadero. La investigación se llevó a cabo en un invernadero de la Universidad Politécnica de Chiapas en 2024. Se empleó un diseño experimental en bloques completos al azar con cinco tratamientos: T1 (control), titanato de hidrógeno, quitosano, TH10QS (titanato de hidrógeno- 10% de quitosano) y TH90QS (titanato de hidrógeno- 90% de quitosano). El estudio reveló que los tratamientos con titanato de hidrógeno y TH10QS mejoraron significativamente el rendimiento del cultivo, aumentando el número de vainas, hojas y botones florales. En cuanto al contenido de clorofila (ca y $c\beta$) y β -carotenoides, se observó un incremento por la aplicación de las nanopartículas. Este estudio demuestra que el uso de nanomateriales de titanatos y de quitosano tiene el potencial de impactar positivamente en el desarrollo del cultivo de frijol, mostrando efecto importante en variables clave de crecimiento y contenido de clorofila. Este enfoque permitió desarrollar estrategias innovadoras que mejoren la productividad agrícola y reduzcan el impacto ambiental.

Palabras clave:

Phaseolus vulgaris L., agricultura moderna, clorofila, estimulación vegetal, nanomateriales, titanatos de hidrógeno.



Introducción

El calentamiento global, junto con el aumento de la población, ha incentivado el uso de agroquímicos para optimizar el rendimiento de los cultivos y garantizar la seguridad alimentaria en un contexto de creciente demanda mundial (Arora *et al.*, 2022). Los fertilizantes químicos han sido cruciales para incrementar la producción agrícola. Sin embargo, su uso generalizado ha provocado un debate sobre sus impactos ambientales y en la salud humana (Tudi *et al.*, 2021). Lo anterior, debido a que los residuos químicos de estos productos pueden contaminar el aire, el agua, el suelo (Bernardes *et al.*, 2015).

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es una leguminosa de gran importancia a nivel mundial, cultivada en diversas regiones del mundo y en diversos climas y ambientes (Vázquez-Herrera y Taboada-Gaytán., 2023). Es uno de los cultivos de mayor importancia debido a que aporta proteínas, almidón, fibra dietética, vitaminas del complejo B y minerales esenciales (Morales-Santos *et al.*, 2017). El frijol es fundamental en la alimentación de la población mexicana y su producción es clave para la soberanía alimentaria. Sin embargo, enfrenta una disminución en la producción debido a múltiples factores (Sangerman-Jarquín *et al.*, 2010).

En este contexto, la nanotecnología ha emergido como una herramienta innovadora en diversos sectores, incluida la industria alimentaria y la agricultura (Jeyaraman y Eltzov, 2025). Se ha demostrado que el emplear nanotecnología es una estrategia prometedora para optimizar el crecimiento de las plantas y mejorar la producción de cultivos (Senthamizh *et al.*, 2025). En la actualidad existen una amplia gama de nanomateriales que se usan en los cultivos agrícolas y que tiene diversos impactos en las plantas (Khan *et al.*, 2024).

Entre esta gama se encuentra los nanomateriales metálicos, no metálicos, a base de carbono y materiales poliméricos (Manimegalai *et al.*, 2023). Dentro de los metálicos, el dióxido de titanio ha llamado la atención debido a sus efectos positivos en las plantas, ya que mejora la eficiencia fotosintética al incrementar la absorción y utilización de la luz (Lian *et al.*, 2020). Se ha reportado que el dióxido de titanio nanoestructurado favorece el crecimiento de plantas de *Zea mays* L. al mejorar la fotosíntesis, la transpiración y la actividad de microorganismos beneficiosos del suelo (Kumari *et al.*, 2024).

Por otro lado, los materiales poliméricos como el quitosano tienen amplio uso en la agricultura debido a sus propiedades clave, como el grado de desacetilación y su peso molecular, que determinan su funcionalidad en diferentes aplicaciones agrícolas (Castro Velázquez *et al.*, 2025). Por lo anterior, el quitosano en forma nano surge como una alternativa para mejorar las prácticas agrícolas de manera sostenible (Wang *et al.*, 2024).

Se ha reportado que mejora el crecimiento de los cultivos de maíz (*Zea mays* L.), tomate (*Solanum lycopersicum*) y papa (*Solanum tuberosum*) (Khairy *et al.*, 2022; Hassan *et al.*, 2022), incluso estimula la concentración de clorofilas y mejora la actividad antioxidante de las plantas (Zayed *et al.*, 2017; Abdel-Maksoud *et al.*, 2022). En la actualidad hasta donde sabemos no hay información publicada sobre el efecto combinado de titanatos de hidrógeno y quitosano para inducir estimulación en plantas de frijol, esta combinación podría tener un efecto bioestimulante.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto bioestimulante de las nanopartículas de titanatos de hidrógeno con quitosano y sus combinaciones en el crecimiento, rendimiento y contenido de clorofila de planta de frijol variedad Frailesano.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

El trabajo de investigación se llevó a cabo en un invernadero de la Universidad Politécnica de Chiapas, ubicado a 16° 36' 56" latitud norte 93° 05' 22" longitud oeste en el municipio de Suchiapa, Chiapas. A una altitud de 460 m, la temperatura media anual fue de 24~35 °C, el clima cálido subhúmedo y las precipitaciones anuales oscilaron entre 1 200 y 3 000 mm (INEGI, 2024).

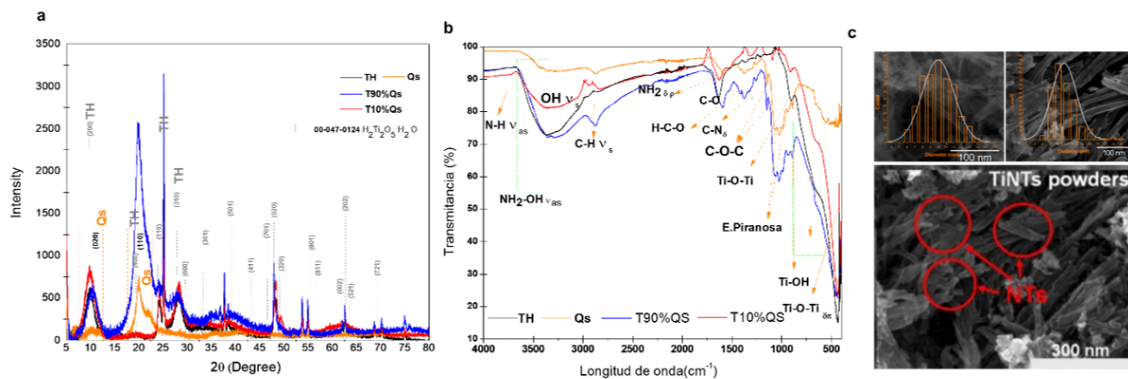
Suelo

El suelo se colectó en los primeros 30 cm de la capa arable en el rancho de la familia Aceros, en el municipio de Suchiapa, Chiapas, ubicado en las coordenadas geográficas 16° 36' 58.4" longitud oeste y 93° 06' 07.3" latitud norte. El suelo, de uso agrícola, se utiliza para cultivos como soya, maíz, frijol y otros. La parcela agrícola generalmente es labrada con tecnificación mediante tractor para la rotación del suelo.

Nanomateriales

Las nanopartículas de titanatos de hidrógeno y quitosano fueron sintetizadas en el Laboratorio de Catálisis Heterogénea (Lanocat) de la División de Materiales Avanzados (DMAV) del Instituto Potosino de Investigaciones Científicas y Tecnológicas AC (IPICYT). Estas se sintetizaron mediante el método hidrotermal asistido por microondas (Liu *et al.*, 2011). Los tamaños de las nanopartículas oscilaron, entre 6 y 26 nm (Figura 1).

Figura 1. Caracterización de los tratamientos mediante las técnicas: a) difracción de rayos X (XRD); b) espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y c) microscopía electrónica de barrido (SEM) (Castillo *et al.*, 2023; Castro *et al.*, 2025).



Establecimiento del experimento

El experimento se estableció con un diseño de bloques aleatorizados. Se incluyeron cinco tratamientos, cada uno con 18 unidades experimentales (una planta como unidad experimental), dando un total de 90 unidades experimentales. Los tratamientos fueron T1: control, T2: titanatos de hidrógeno (TH), T3: quitosano (Qs), T4: titanatos de hidrógeno/quitosano 10% Qs (T10% QS), T5: titanatos de hidrógeno/quitosano 90% Qs (T90% QS). Para cada tratamiento se utilizaron 200 mg de nanomaterial.

Se usaron bolsas de polietileno con capacidad de 3 kg, las cuales se llenaron con suelo agrícola previamente muestreado. Se utilizaron semillas de frijol variedad Frailesca, recolectadas en la región Frailesca. La siembra se realizó en las bolsas con suelo humedecido a una profundidad de 3~5 cm, utilizando cuatro semillas por bolsa. Después de la germinación se seleccionó la plántula más vigorosa y el resto se eliminaron.

La fertilización con los nanomateriales se aplicó vía drench (directamente al suelo), dosificando de manera individual en cada unidad experimental con una frecuencia de 15 días posteriores a la germinación: 5 ml planta⁻¹, los 15 días de la primera aplicación: 10 ml planta⁻¹, 15 días después de la segunda aplicación: 15 ml planta⁻¹ y finalmente 15 días de la tercera aplicación: 20 ml planta⁻¹.

Variables evaluadas

Se realizó un control de variables agronómicas para el monitoreo de crecimiento y determinar la interacción de nanomaterial con la planta y sus efectos en su crecimiento. Las variables agronómicas que se evaluaron en este trabajo fueron altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas, botones florales, biomasa fresca de raíz, biomasa aérea fresca y seca, longitud radical y número de vainas.

Determinación de clorofilas y β -carotenoides

Se realizó un muestreo de material vegetal por unidad experimental de cada tratamiento. Las hojas se recolectaron durante el periodo de floración de la planta de frijol y se almacenaron en bolsas al vacío debidamente etiquetadas. Estas fueron almacenadas en refrigeración a -2°C hasta el momento que se realizó la extracción. La clorofila de las hojas se determinó mediante la técnica descrita por Senthilkumar *et al.* (2021) con modificaciones para estandarizar a 10 ml. Utilizando 100 g de tejido fresco, se preparó una solución de acetona al 80%, añadiendo 20 ml de agua destilada a 80 ml de acetona.

Posteriormente, la mezcla se trituró en un mortero hasta obtener una consistencia homogénea y se transfirió a un tubo Falcon para su centrifugación en una Frontier™ Serie 5000, modelo FC5707+R05, a 3000 RPM durante 5 min. El sobrenadante se extrajo con una micropipeta y se almacenó en un matraz aforado de 10 ml. El sedimento se lavó con 5 ml de acetona al 80% y se sometió nuevamente a centrifugación. Finalmente, las muestras fueron aforadas con acetona al 80% y analizadas en un espectrofotómetro UV-Vis Agilent Technologies Cary Series 5000, midiendo la absorbancia a 643, 645 y 470 nm.

Los valores obtenidos fueron procesados en Excel para determinar la concentración de clorofila α , clorofila β y β -carotenoides expresados en mg 100 g de peso fresco y los cálculos se realizaron mediante las siguientes ecuaciones: Clorofila (C α) ($\mu\text{g ml}^{-1}$) = $[(12.25 A_{663} - 2.79 A_{645}) (1\ 000\ \text{v})] / [1\ 000w]$ 1). Clorofila β (C β) ($\mu\text{g ml}^{-1}$) = $[(21.5 A_{645} - 5.10 A_{663}) (1\ 000\ \text{v})] / [1\ 000w]$ 2). Carotenoides (β) c(x+c) ($\mu\text{g ml}^{-1}$) = $[(1\ 000 A_{470} - 1.82 ca - 5.02 cb) / (198)] (1\ 000\ \text{v}) / [1\ 000w]$ 3).

Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (Anova) para determinar las diferencias entre tratamientos, y una prueba de medias de acuerdo con la diferencia mínima Significativa de Fisher ($\alpha = 0.05$). Para realizar los análisis se usó el paquete estadístico InfoStat (v2019). El diseño de las figuras se realizó con el software SigmaPlot (V12.0).

Resultados y discusión

Crecimiento

La altura de planta, diámetro de tallo y el número de hojas mostraron diferencias estadísticas significativas por la aplicación de los nanomateriales respecto al control, además, se observó una tendencia de estimulación en las tres variables respuestas por la aplicación de TH y T10QS (Cuadro 1). La altura de la planta de frijol aumentó 243.82% cuando se expusieron a TH, mientras que el tratamiento T10QS logró incrementar en un 99.48% la altura de la planta.



Cuadro 1. Efecto de los nanomateriales en las variables de crecimiento de las plantas de frijol.

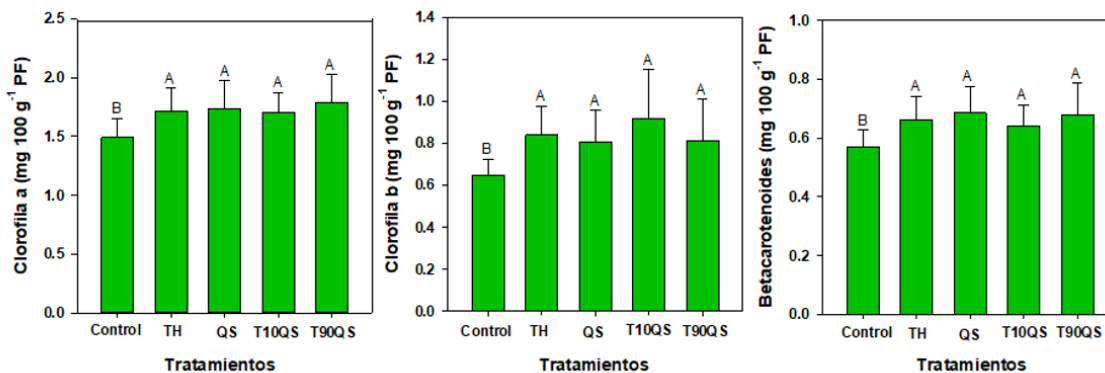
Tratamientos	Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Núm. de hojas	Longitud radical (cm)
Control	30.83 ±8c	3.08 ±0.2b	25.33 ±7c	34.17 ±11.84a
TH	106.17 ±20.4a	4.08 ±0.2a	47.17 ±8.2a	28.33 ±11.08a
QS	35 ±9.8c	3.58 ±0.8ab	27.5 ±6.4c	33.67 ±5.01a
T10QS	61.5 ±25.7b	3.83 ±0.7a	41.83 ±15a	28.67 ±14.26a
T90QS	31 ±4.5c	3.42 ±0.8ab	32.67 ±18.4bc	30 ±9.76a
CV (%)	30.05	17.27	34.51	34.37

Medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p \leq 0,05$). $\pm$ = desviación estándar; CV= coeficiente de variación; TH= titanatos de hidrógeno; QS= quitosano; T10QS= titanatos de hidrógeno/quitosano; T90QS= titanatos de hidrógeno/quitosano 90%.

Se ha reportado que concentraciones de 100 mg L⁻¹ de nanopartículas de TiO₂ aumenta significativamente la altura de la planta de *Dracocephalum moldavica* (Gohari *et al.*, 2020). El titanio en su forma nanoestructurada aumenta el crecimiento de las plantas debido a que estimula la producción de clorofilas y mejora la absorción de magnesio, hierro y nitrógeno (Farahi *et al.*, 2023).

El aumento del crecimiento de las plantas de frijol en este estudio podría estar relacionado directamente con la mayor concentración de clorofila como se muestra en la Figura 2. Además, la aplicación de titanio en forma nano tiene efectos estimulativos que se ven reflejados en el crecimiento de las plantas y el tamaño de las hojas debido a una mejora en los procesos fisiológicos y moleculares (Trela-Makowej *et al.*, 2024).

Figura 2. Concentración de clorofila a, b y β -carotenoides en hojas de plantas de frijol sometidas a tratamientos de nanomateriales. Las barras de error representan las desviaciones estándar, mientras que las letras mayúsculas diferentes por barra indican diferencias estadísticas según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p \leq 0,05$, n= 6). PF= peso fresco; TH= titanatos de hidrógeno; QS= quitosano; T10QS= titanatos de hidrógeno/quitosano 10%; T90QS= titanatos de hidrógeno/quitosano 90%.



Por otra parte, en este estudio el quitosano aplicado solo no mostró un efecto significativo, sin embargo, cuando se combinó con 10% de titanatos de hidrógeno si hubo un efecto bioestimulante. El quitosano puede estimular el crecimiento de las plantas debido a que proporciona nutrientes y puede promover procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2024).

En cuanto al diámetro del tallo, las plantas tratadas con TH y T10QS mostraron un incremento del 32.46% y 24.35%, respectivamente, en comparación con el control. Respecto al número de hojas, la aplicación de TH en plantas de frijol resultó en un aumento del 86.22%, mientras que el tratamiento con T10QS logró un incremento del 65.14%, evidenciando un efecto positivo de ambos tratamientos sobre el desarrollo foliar.

La aplicación de nanomateriales vía drench no tuvo un efecto estadístico significativo en la longitud radical. El titanio en su forma nano con aplicaciones vía suelo y foliar tiene efectos beneficiosos en concentraciones bajas, por lo tanto, sugiere su potencial como agente promotor del crecimiento en la agricultura (Machanuru *et al.*, 2024). En la longitud radical no hubo impacto por la aplicación de los nanomateriales; sin embargo, las respuestas de las plantas pueden ir desde la bioestimulación hasta la toxicidad o a un impacto nulo (Benavides-Mendoza *et al.*, 2021).

En el tratamiento T90QS, la alta proporción de quitosano (90%) puede explicar la escasa diferencia respecto al control. Aunque el quitosano actúa como bioestimulante, mejorando fotosíntesis, crecimiento y tolerancia al estrés, su efecto tiende a estabilizar el estado fisiológico en condiciones no estresantes, sin inducir grandes cambios visibles (Ahmed *et al.*, 2020).

Su acción se manifiesta principalmente a nivel bioquímico, parámetro no evaluado en este trabajo, estimulando defensas como fitoalexinas y enzimas antioxidantes, lo cual no siempre se traduce en aumentos de biomasa o altura en el corto plazo (Ithape *et al.*, 2024). Además, el bajo contenido de titanatos (10%) pudo no ser suficiente para potenciar los efectos del quitosano o generar respuestas adicionales. Por ello, el tratamiento mostró una respuesta similar al control en los parámetros medidos.

Componentes del rendimiento

La producción de biomasa seca aérea y radical no fue estimulada por la aplicación de nanomateriales; sin embargo, se observó un ligero incremento por el tratamiento de T10QS, aunque fue estadísticamente igual al control (Cuadro 2). La aplicación de TH incrementó un 192.71% la producción de botones florales el resto de los tratamientos fueron estadísticamente igual al control. En cuanto al número de vainas el tratamiento de TH estimuló 84.4% la producción de vainas, mientras que la aplicación de T10QS logró aumentar en un 57.7% esta variable.

Cuadro 2. Componentes del rendimiento de las plantas de frijol en función de la aplicación de los nanomateriales.

Tratamientos	Biomasa seca aérea (g)	Biomasa seca radical (g)	Botones florales	Núm. de vainas
Control	25.17 ±5.49a	6.67 ±0.52a	4.67 ±2.5b	7.5 ±3.1bc
TH	25.33 ±6.35a	6.17 ±0.75a	13.67 ±7.4a	13.83 ±4.2a
QS	24 ±6.51a	7.83 ±4.02a	5.83 ±1.7b	6.17 ±1.7c
T10QS	29.17 ±10.36a	7 ±1.1 a	8.5 ±4.1b	11.83 ±7.6a
T90QS	21.83 ±4.75a	6 ±0.89a	4.33 ±2.8b	4.83 ±0.98c
CV (%)	27.19	28.49	57.35	49.13

Medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($p \leq 0.05$). $\pm$ = desviación estándar; CV= coeficiente de variación; TH= titanatos de hidrógeno; QS= quitosano; T10QS= titanatos de hidrógeno/quitosano; T90%QS= titanatos de hidrógeno/quitosano 90%.

Las nanopartículas mejoran la productividad de los cultivos debido a que actúan como moléculas de señalización, activando genes, mejorando los mecanismos de defensa y mejorando la absorción de nutrientes (Francis *et al.*, 2024). El incremento en crecimiento y rendimiento de una planta expuesta a nanomateriales se debe a su elevada relación superficie volumen y sus propiedades físicas y químicas únicas (Jie *et al.*, 2024). En cuanto al incremento de botones florales por la aplicación de TH y T10QS este puede estar relacionado con la regulación de las fitohormonas, debido a que los nanomateriales pueden regular la síntesis de alguna hormona específica a través de una comunicación cruzada de señalización (Tripathi *et al.*, 2022).

Concentración de pigmentos fotosintéticos

La concentración de clorofilas (α - β) y β -carotenoides en plantas de frijol expuestas a nanopartículas de TH y QS y a su combinación con diferentes porcentajes mostró diferencias estadísticas significativas respecto al control (Figura 1). Interesantemente, todos los tratamientos evaluados aumentaron la concentración de clorofilas. El contenido de clorofila # aumentó 19.79% cuando las plantas fueron tratadas con T90QS.

En cuanto a la clorofila β , el tratamiento de T10QS aumentó hasta un 42.68%. Por otra parte, el QS logró aumentar 21.42% de β -carotenoides en las plantas de frijol. Se ha reportado que los nanomateriales estimulan la producción de clorofilas y los carotenoides (Li *et al.*, 2024).

En el caso de los nanomateriales a base de titanio han presentado un efecto positivo en la absorción de luz debido a sus propiedades fotocatalíticas y conductividad térmica (Ebrahimi *et al.*, 2016), además, los nanomateriales a base de titanio pueden acelerar el proceso de transferencia de electrones en los centros de fotorreacción, reducir el NADPH y estimular la fotólisis del agua (Xinyi *et al.*, 2024). Esta capacidad de absorción de luz en la clorofila generará efectos bioestimulantes en la fotosíntesis (Medina-Pérez *et al.*, 2018).

Conclusiones

La aplicación de TH solo y en su combinación con 10% de QS generó un efecto estimulante en variables del rendimiento del cultivo. La aplicación de los nanomateriales en el cultivo del frijol variedad Frailescano tuvo un efecto estimulante en el contenido de pigmentos fotosintéticos. Los nanomateriales en la agricultura pueden ser una tecnología sustentable para mejorar la productividad agrícola.

Bibliografía

- 1 Arora, S.; Murmu, G.; Mukherjee, K.; Saha, S. and Maity, D. 2022. A comprehensive overview of nanotechnology in sustainable agriculture. *Journal of Biotechnology*. 355:21-41. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.06.007>.
- 2 Abdel-Maksoud, M. I. A.; Bekhit, M.; Sherif, D. M.; Sofy, A. R. and Sofy, M. R. 2022. Gamma radiation-induced synthesis of a novel chitosan/silver/Mn-Mg ferrite nanocomposite and its impact on cadmium accumulation and translocation in brassica plant growth. *Países Bajos. International Journal of Biological Macromolecules*. 194:306-316. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.197>.
- 3 Ahmed, K. B. M.; Khan, M. M. A.; Siddiqui, H. and Jahan, A. 2020. Chitosan and its oligosaccharides, a promising option for sustainable crop production a review. *Carbohydrate Polymers*. 227:115331. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115331>.
- 4 Benavides-Mendoza, A.; González-Moscoso, M.; Ojeda-Barrios, D. L. and Fuentes-Lara, L. O. 2021. Biostimulation and toxicity: two levels of action of nanomaterials in plants. *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection: recent Advances and Impacts*. 283-303 pp. <https://doi.org/10.1002/9781119745884.ch14>.
- 5 Bernardes, M. F. F.; Pazin, M.; Pereira, L. C. and Dorta, D. J. 2015. Impact of pesticides on environmental and human health. *Toxicology studies-cells, drugs and environment*. 195-233 pp.
- 6 Castillo, P. C. H. D.; Castro-Velázquez, V. and Rodríguez-González, V. 2023. Adsorption and photocatalytic-conjugated activity of a chitosan-functionalized titanate coating for the removal of the drug clonazepam from drinking water. *Alemania. Environmental Science and Pollution Research*. 32:10553-10568. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30215-2>.
- 7 Castro-Velázquez, V.; Hernández-Castillo, P. C.; Díaz-Cervantes, E. and Rodríguez-González, V. 2025. Unraveling the role of chitosan in enhancing the photodegradation of ciprofloxacin by using chitosan-titanates composites: experimental and in-silico approach. *Journal of Environmental Management*. 375:124265. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124265>.
- 8 Ebrahimi, A.; Galavi, M.; Ramroudi, M. and Moaveni, P. 2016. Effect of TiO₂ nanoparticles on antioxidant enzymes activity and biochemical biomarkers in pinto bean (*Phaseolus*

- vulgaris* L.). Journal of Molecular Biology Research. 6(1):58-66. <http://dx.doi.org/10.5539/jmbr.v6n1p58>.
- 9 Farahi, M. S. M.; Yazdi, T. M. E.; Einafshar, E.; Akhondi, M.; Ebadi, M.; Azimipour, S.; Mahmoodzadeh, H. and Iranbakhsh, A. 2023. The effects of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles on physiological, biochemical, and antioxidant properties of Vitex plant (*Vitexagnus castus* L.). Heliyon. 9(11):e22144. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22144>.
- 10 Francis, D.V.; Abdalla, A. K.; Mahakham, A.; Sarmah, A. K. and Zhmed, A. F. R. 2024. Interaction of plants and metal nanoparticles: exploring their molecular mechanisms for sustainability. agriculture and crop improvement. Environment International. 190:108859. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108859>.
- 11 Gohari, G.; Mohammadi, A.; Akbari, A.; Panahirad, S.; Dadpour, M. R.; Fotopoulos, V. and Kimura, S. 2020. Titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of *Dracocephalum moldavica*. Scientific Reports. 10:912. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57794-1>.
- 12 Hassan, E. O.; Shoala, T.; Attia, A. M. F.; Badr, O. A. M.; Mahmoud, S. Y. M.; Farrag, E. S. H. and El-Fiki, I. A. I. 2022. Chitosan and nano-chitosan for management of Harpophora maydis: approaches for investigating antifungal activity, pathogenicity, maize-resistant lines, and molecular diagnosis of plant infection. Journal of Fungi. 8(5):509. <https://doi.org/10.3390/jof8050509>.
- 13 INEGI, 2024. Compendio de Información Geográfica Municipal 2010. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=07086>.
- 14 Ithape, D.; Dalvi, S. and Srivastava, A. K. 2024. Chitosan-thiourea and their derivatives: applications and action mechanisms for imparting drought tolerance. Journal of Plant Physiology. 303:154365. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2024.154365>.
- 15 Jeyaraman, M. and Eltzov, E. 2025. Development of the alginate-gelatin-based biosensor for quick B. subtilis detection in foods. Talanta. 288:127739. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.127739>.
- 16 Jie, R.; Wu, H.; Yichao, E.; Ye, W.; Xiangpei, K. and Yin, K. 2024. Small particles, big effects: how nanoparticles can enhance plant growth in favorable and harsh conditions. Journal of Integrative Plant Biology. 66:1274-1294. <https://doi.org/10.1111/jipb.13652>.
- 17 Khairy, A. M.; Tohamy, M. R. A.; Zayed, M. A.; Mahmoud, S. F.; El-Tahan, A. M.; El-Saadony, M. T. and Mesiha, P. K. 2022. Eco-friendly application of nano-chitosan for controlling potato and tomato bacterial wilt. Saudi Journal of Biological Sciences. 29(4):2199-2209. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.041>.
- 18 Khan, S.; Wang, A.; Liu, J.; Khan, I.; Sadiq, S.; Khan, A. and Bououdina, M. 2024. Bio-inspired green nanomaterials for tomato plant cultivation: An innovative approach of green nanotechnology in agriculture. Países Bajos. Chemical Engineering Journal Advances. 20:100677. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.100677>.
- 19 Kumari, K.; Rani, N. and Hooda, V. 2024. Unravelling the effects of nano SiO₂, nano TiO₂ and their nanocomposites on Zea mays L. growth and soil health. Reino Unido. Scientific Reports. 14(1):13996. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61456-x>.
- 20 Lian, J.; Zhao, L.; Wu, J.; Xiong, H.; Bao, Y.; Zeb, A.; Tang, J. and Liu, W. 2020. Foliar spray of TiO₂ nanoparticles prevails over root application in reducing Cd accumulation and mitigating Cd-induced phytotoxicity in maize (Zea mays L.). Chemosphere. 239:124794. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124794>.

- 21 Li, P.; Xia, Y.; Song, K. and Liu, D. 2024. The impact of nanomaterials on photosynthesis and antioxidant mechanisms in gramineae plants: research progress and future prospects. *Plants*. 13(7):984. <https://doi.org/10.3390/plants13070984>.
- 22 Liu, G.; Yang, D.; Zhu, Y.; Ma, J.; Nie, M. and Jiang, Z. 2011. Titanate nanotubes-embedded chitosan nanocomposite membranes with high isopropanol dehydration performance. *Reino Unido. Chemical Engineering Science*. 66(18):4221-4228. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.06.005><https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.06.005>.
- 23 Manimegalai, S.; Vickram, S.; Deena, S. R.; Rohini, K.; Thanigaivel, S.; Manikandan, S.; Subbaiya, R.; Karmegam, N.; Kim, W. and Govarthan, M. 2023. Carbon-based nanomaterial intervention and efficient removal of various contaminants from effluents. A review. *Chemosphere*. 312(1):137319. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137319>.
- 24 Morales-Santos, M. E.; Peña-Valdivia, C. B.; García-Esteve, A.; Aguilar-Benítez, G. y Kohashi-Shibata, J. 2017. Características físicas y de germinación en semillas y plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre, domesticado y su progenie. *Agrociencia*. 51(1):43-62.
- 25 Medina-Pérez, G.; Fernández-Luqueño, F.; Trejo-Téllez, L. I.; López-Valdez, F. and Pampillón-González, L. 2018. Growth and development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Pinto Saltillo exposed to iron, titanium, and zinc oxide nanoparticles in an agricultural soil. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 16(2):1883-1897. <https://doi.org/10.15666/aeer/1602-18831897>.
- 26 Machanuru, R.; Shrivastava, M.; Singh, R.; Singh, B.; Chakraborty, D.; Ramalingappa, P. L. and Narayan, M. 2024. Plant enzymatic activity as an indicator of nano-TiO₂ exposure in rice ecosystems, *Plant Nano Biology*. 10:100117. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100117>.
- 27 Ramírez-Rodríguez, S. C.; Preciado-Rangel, P.; Cabrera-Fuente, M.; González-Morales, S. and Ortega-Ortiz, H. 2024. Chitosan nanoparticles as biostimulant in lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants, *phyton-international journal of experimental botany*. 93(4):777-787. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.048096>.
- 28 Sangerman-Jarquín, D. M.; Acosta-Gallego, J. A.; Schwenstesius-Rindermann, R.; Damián-Huato, M. Á. y Larqué-Saavedra, B. S. 2010. Consideraciones e importancia social en torno al cultivo del frijol en el centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1(3):363-380.
- 29 Senthamizh, R.; Vishwakarma, P.; Sinharoy, A.; Sinha, R.; Sharma, S. and Mal, J. 2025. Biogenic nanoparticles and their application in crop protection against abiotic stress: A new dimension in agri-nanotechnology. *The Science of the Total Environment*. 958:177884. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177884>.
- 30 Tudi, M.; Daniel Ruan, H.; Wang, L.; Lyu, J.; Sadler, R.; Connell, D.; Chu, C. and Phung, D. T. 2021. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International journal of environmental research and public health*. 18(3):1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>.
- 31 Trela-Makowej, A.; Orzechowska, A. and Szymańska, R. 2024. Less is more: The hormetic effect of titanium dioxide nanoparticles on plants. *Science of the total environment*. 910:168669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168669>.
- 32 Tripathi, D.; Singh, M. and Pandey-Rai, S. 2022. Crosstalk of nanoparticles and phytohormones regulate plant growth and metabolism under abiotic and biotic stress. *Plant Stress*. 6:100107. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100107>.
- 33 Vázquez-Herrera, P. y Taboada-Gaytán, O. R. 2023. El almacenamiento prolongado afecta la calidad nutricional y el tiempo de cocción del frijol ayocote. México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 14(29):e3542. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i29.3542>.

- 34 Wang, X.; He, M.; Wang, X.; Liu, S.; Luo, L.; Zeng, Q.; Wu, Y.; Zeng, Y.; Yang, Z.; Sheng, G.; Ren, P.; Ouyang, H. and Jia, R. 2024. Emerging nanochitosan for sustainable agriculture. Suiza. International Journal of Molecular Sciences. 25(22):12261. <https://doi.org/10.3390/ijms252212261>.
- 35 Xinyi, L.; Muhammed, N. and Yukui, R. 2024. Effects of nanofertilizers on the mechanism of photosynthetic efficiency in plants: a review. Phyton-International Journal of Experimental Botany. 93(12):3197-3216. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.059281>.
- 36 Zayed, M. M.; Elkafafi, S. H.; Zedan, A. M. and Dawoud, S. F. M. 2017. Effect of nano chitosan on growth, physiological and biochemical parameters of *Phaseolus vulgaris* under salt stress. Egypt. Journal of Plant Production. 8(5):577-585. Doi. 10.21608/jpp.2017.40468.



Efecto bioestimulante de nanopartículas de titanatos de hidrógeno con quitosano en frijol Frailesco

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 00 May 2025
Date accepted: 00 August 2025
Publication date: 15 October 2025
Publication date: Sep-Oct 2025
Volume: 16
Issue: esp30
Electronic Location Identifier: e4049
DOI: 10.29312/remexca.v16i30.4049
Article Id (other): 00012

Categories

Subject: Artículos

Palabras clave

Palabras clave

Phaseolus vulgaris L.
agricultura moderna
clorofila
estimulación vegetal
nanomateriales
titanatos de hidrógeno

Counts

Figures: 2

Tables: 2

Equations: 0

References: 36