

Efecto bioestimulante de nanoquitosán-yodo en el crecimiento y vigor de plantas de tomate

Biostimulant effect of nanochitosan-iodine on the growth and vigor of tomato plants

Luz Leticia Rivera-Solís¹ , Hortensia Ortega-Ortiz² , Adalberto Benavides-Mendoza³ , María Liliana Flores-López⁴ , Armando Robledo-Olivo⁵ , Susana González-Morales^{6*} 

¹Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

²Centro de Investigación en Química Aplicada, Enrique Reyna H. 140, CP. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

³Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

⁴Centro de Investigación e Innovación Científica y Tecnológica, Universidad Autónoma de Coahuila, Avenida 3 y 16, colonia Lourdes, CP. 25070 Saltillo, Coahuila, México.

⁵Departamento de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

⁶CONAHCYT- Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia: qfb_sgm@hotmail.com

Nota científica

Recibido: 31 de enero 2023

Aceptado: 08 de abril 2024

RESUMEN. El uso de bioestimulantes es una alternativa en la producción de plantas que permite aumentar el crecimiento y vigor. El objetivo del trabajo fue evaluar la aplicación de complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) en el crecimiento y desarrollo de plantas de tomate. La aplicación de los tratamientos fue de forma foliar cada 15 días. Se evaluaron variables de crecimiento, vigor y rendimiento en las plantas. Los resultados muestran que solamente para el diámetro de tallo se presentaron diferencias significativas con respecto al testigo absoluto (T0); aumentando al aplicar NPsCs-KIO₃ 25 mg L⁻¹ un 29% a los 20 ddt, NPsCs-KIO₃ 5 mg L⁻¹ en 19% a los 60 ddt y con NPsCs en 27% a los 120 ddt con respecto al T0. El aumento del diámetro de tallo está asociado a un mayor vigor en las plantas, lo que se traduce a un efecto bioestimulante en las plantas de tomate.

Palabras clave: Bioestimulación, biopolímeros, nanotecnología, yodato, yoduro.

ABSTRACT. The use of biostimulants is an alternative in plant production that allows increasing growth and vigor. The objective of this work was to evaluate the application of nanochitosan-iodine complexes (NPsCs-I) in the growth and development of tomato plants. The application of the treatments was foliar every 15 days. Plant growth, vigor and yield variables were evaluated. In the results, only in the stem diameter variable, there were significant differences with respect to the absolute control (T0). The treatment of NPsCs-KIO₃ 25 mg L⁻¹ increased 29% at 20 dat, NPsCs-KIO₃ 5 mg L⁻¹ increased 19% at 60 dat and NPsCs increased 27% at 120 dat compared to T0. The increase in stem diameter is associated with greater plant vigor, which translates into a biostimulant effect on tomato plants.

Keywords: Biostimulation, biopolymers, nanotechnology, iodate, iodine.

Como citar: Rivera-Solís LL, Ortega-Ortiz H, Benavides-Mendoza A, Flores-López ML, Robledo-Olivo A, González-Morales S (2024) Efecto bioestimulante de nanoquitosán-yodo en el crecimiento y vigor de plantas de tomate. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(2): e3623. DOI: 10.19136/era.a11n2.3623.

INTRODUCCIÓN

El uso de bioestimulantes es una estrategia para el desarrollo de los cultivos, ya que al aplicarse en las plantas estimulan procesos naturales que benefician la absorción de nutrientes, incrementan la tolerancia al estrés biótico o abiótico, mejoran la calidad de frutos e incrementan el rendimiento (Du-Jardin 2015, Tanya y Leiva-Mora 2019). Dentro de la clasificación de los bioestimulantes, se encuentran los biopolímeros como el quitosán (Cs), el cual es un subproducto de la industria de los mariscos (Reyes-Pérez 2020). El quitosán posee una amplia variedad de efectos en las plantas, ya que actúa como elicitador vegetal induciendo la producción de fitoalexinas; protege a las plantas de enfermedades por patógenos inhibiendo el crecimiento microbiano; activa la vía de las MAP-cinasas induciendo la expresión de genes de defensa; además, participa en la síntesis de alcaloides y reguladores del crecimiento vegetal (Yu *et al.* 2021). Sin embargo, este polímero presenta insolubilidad en medios acuosos lo que limita su potencial de aplicación (Jiménez-Gómez y Cecilia 2020). Recientemente, las nanopartículas basadas en quitosán (NPsCs) han demostrado un efecto positivo en las plantas como mejoradores de suelo y bioestimulantes frente a diferentes tipos de estrés en los cultivos, mostrando una mayor efectividad que el material original (Jakhar *et al.* 2022). Así mismo, se ha estudiado el potencial como nanomaterial por su capacidad de interacción con otras moléculas y por su disponibilidad de grupos hidroxilo y amino que proporcionan una excelente plataforma para la formación de complejos con otras moléculas/compuestos, ayudando a transformarlos en complejos más estables con mejores propiedades (Chandrasekaran *et al.* 2020). Tal es el caso del yodo (I), que es un oligoelemento traza esencial para la dieta de los seres humanos que regula el metabolismo en general y es un componente esencial de las hormonas tiroideas tiroxina (T4) y triyodotironina (T3), que son fundamentales para el funcionamiento del hígado, los riñones, los músculos, el cerebro y el sistema nervioso central (Issue *et al.* 2022). A nivel mundial se estima que del 30 al 45% de la población presenta trastornos por deficiencia de I (TDI) debido a una baja ingesta desarrollando principalmente bocio, cretinismo, hipotiroidismo, déficit mental y muerte al nacer (Jácome-Roca 2021). El I es un elemento que no se incluye en los planes de fertilización de las plantas, ya que no es considerado un elemento esencial para éstas (Duborská *et al.* 2022). Algunos estudios han demostrado efectividad en la acumulación de I en la producción de cultivos con aplicaciones foliares y al sustrato en forma de yoduro de potasio (KI) y yodato de potasio (KIO₃), demostrando mayor efectividad la aplicación foliar en hortalizas de hoja (Kiferle *et al.* 2021), y en plantas de frutilla (Silva-Marrufo *et al.* 2020). Sin embargo, el efecto del I en las plantas está determinado por múltiples factores que incluyen la concentración aplicada, el tipo de sal de I aplicada y la especie de planta (Riyazuddin *et al.* 2022). En este sentido, el cultivo de tomate representa una alternativa para evaluar la bioestimulación con NPsCs-I, ya que tiene un alto índice de consumo en fresco que aporta nutrientes a la dieta (vitaminas, minerales, antioxidantes), además de tener relevancia económica para nuestro país (Li *et al.* 2021). Por lo tanto, el objetivo fue la evaluación de complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) en plantas de tomate para determinar su efecto bioestimulante relacionado con variables de crecimiento y vigor.

MATERIALES Y MÉTODOS

Síntesis de complejos de NPsCs-I

La síntesis de los complejos de NPsCs-I se realizó en el Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA). Se utilizó quitosán (Cs) de un peso molecular viscosimétrico de $200\,000\text{ g mol}^{-1}$ de la marca Marine Chemicals (Marine, Hydrocolloids, Kerala, India), se preparó una solución al 0.5% (v/v) con agua desionizada y se filtró. Se utilizó la metodología descrita por Manikandan y Sathiyabama (2016) con algunas modificaciones. Las NPsCs se formaron por la interacción electrostática entre el grupo amino protonado del quitosán y el grupo fosfato cargado negativamente del tripolifosfato de sodio (TPP) (Sigma-Aldrich, USA) al 0.5% (p/v), el cual fue incorporado a la solución por goteo en una relación 3:1 (v/v) de Cs:TPP y se dejó agitando durante 24 h en una parrilla de agitación de la marca Thermo a 400 rpm. Posteriormente la suspensión coloidal se centrifugó a 8 500 rpm durante 15 minutos a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, el precipitado se lavó dos veces para eliminar las sustancias sin reaccionar y se secó por liofilización en un equipo de la marca LABCONCO. Para preparar las dispersiones de las NPsCs se mezcló 1 g en 100 mL de agua desionizada, 2 mL de tween 80 y 2 mL de Bionex (adherente) y se dispersaron en un sonicador al 50% de frecuencia durante 3 min por tres ciclos y se aforó a 1 L. Para la formación de complejos se siguió el procedimiento descrito anteriormente incorporando a la suspensión coloidal soluciones de KI y KIO_3 . Los tratamientos, solo con sales yodadas se prepararon en agua desionizada con 5 y 25 mg L^{-1} de KI y KIO_3 . El tamaño de las NPsCs fue de 100-500 nm, de los complejos NPsCs-I con KI de 50-250 nm y con KIO_3 de 50-450 nm, presentando todas las nanopartículas una forma esférica, las demás caracterizaciones se encuentran actualmente en proceso, así como la solicitud de la patente Ortega-Ortiz *et al.* (2022).

Ubicación del experimento

El estudio se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México, durante el periodo de mayo-octubre 2022 en un invernadero tipo capilla del departamento de Horticultura de la UAAAN. La temperatura promedio fue de $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 50 a 60% de humedad relativa.

Manejo de cultivo

Se utilizaron semillas de *Lycopersicon esculentum* el CID F1 de la casa comercial Harris Moran sembradas en charolas de poliestireno de 200 cavidades. A los 24 días después de la siembra, se trasplantaron en bolsas de polietileno de 10 L de capacidad, usando como sustrato peat moss y perlita (1:1 v/v). La nutrición fue provista a través de una solución Steiner de acuerdo con su etapa fenológica (Steiner 1961). Las plantas se distribuyeron a una distancia de 30 cm entre plantas y 100 cm entre filas. El cultivo se desarrolló a un solo tallo, hasta la producción del sexto racimo dando un manejo de labores culturales de inicio a fin, tales como clip de inicio y tutoro, deshoje, desbrote, enreda y cosecha. La duración del experimento fue de 120 días después del trasplante (ddt).

Diseño experimental

El experimento se realizó siguiendo un diseño de bloques completos al azar con 10 tratamientos y cinco unidades experimentales de cuatro plantas por tratamiento. Los tratamientos se describen a continuación: testigo absoluto (T0), tratamiento control de nanoquitosán (NPsCs), cuatro tratamientos con las sales: KI a 5 y 25 mg L⁻¹, KIO₃ 5 y 25 mg L⁻¹ y cuatro complejos NPsCs-KI con 5 y 25 mg L⁻¹ y NPsCs-KIO₃ con 5 y 25 mg L⁻¹. La aplicación de los tratamientos se realizó desde el trasplante y en intervalos de 15 días, en un horario de 7:00 a 10:00 am para facilitar la difusión de los complejos debido a la apertura estomálica. En total se realizaron ocho aplicaciones a lo largo del ciclo las cuales se realizaron de manera foliar asperjándose con un atomizador manual de presión controlada de la marca truper en el haz de la hoja.

Variables evaluadas

La evaluación de variables agronómicas fue en intervalos de 20 días a los 20, 40, 60, 80 y hasta los 120 ddt (días después del trasplante), midiendo diámetro de tallo (mm) con un vernier digital a partir de dos centímetros del cuello de la raíz, número de hojas mediante conteo manual y altura de planta (m) con un flexómetro midiendo desde el cuello de la raíz hasta la axila de la hoja más joven. La variable de conductancia estomálica se midió con un porómetro marca Decagon Devices Inc modelo SC-1 a los 60 y 120 ddt. El cultivo se desarrolló a un solo tallo y se llevó a producción hasta el sexto racimo evaluando el rendimiento en g planta⁻¹, número de frutos por planta y biomasa fresca y seca (g). Las variables agronómicas y de rendimiento se midieron en 5 repeticiones compuestas por cuatro plantas. En el caso de conductancia estomálica y biomasa se midieron 3 repeticiones compuestas por dos plantas por tratamiento.

Análisis estadístico de datos

Los datos se analizaron con el programa estadístico InfoStat versión 2020, para determinar diferencias entre medias se realizó la prueba DMS Fisher a una probabilidad de $p \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables agronómicas

Los resultados de este trabajo se enfocaron en evaluar el efecto bioestimulante de complejos de NPsCs-I en el crecimiento y vigor de plantas de tomate, debido a la naturaleza de los compuestos que conforman el complejo. En la Figura 1, se muestran los resultados de la variable diámetro de tallo, en la cual se encontraron diferencias significativas entre tratamientos con respecto al testigo absoluto (T0) a los 20, 60 y 120 ddt. En etapa de plántula a los 20 ddt con la aplicación de NPsCs-KIO₃ con 25 mg L⁻¹ se presentó un incremento significativo del 28.94% con respecto al testigo (T0). Así mismo, en etapa vegetativa a los 60 ddt con un total de cuatro aplicaciones consecutivas, la aplicación de NPsCs-KIO₃ con 5 mg L⁻¹ presentó un incremento significativo del 37% con respecto a T0. Actualmente no hay información acerca del efecto bioestimulante de los complejos de NPsCs-I. Sin embargo, el efecto observado en las plantas tratadas con NPsCs-I se puede asociar a la interacción entre las estructuras moleculares de las células y los complejos del nanomaterial de estudio (Juárez-Maldonado *et al.* 2019). Así mismo, el

uso de nanopartículas puede estimular el crecimiento vegetativo en algunas especies al actuar como bioestimulantes, lo que favorecería su desarrollo y crecimiento (Sathiyabama y Manikandan 2021). En este sentido, el uso de nanomateriales es capaz de alterar algunos de los procesos fisiológicos de las plantas al aumentar la eficiencia del uso de nitrógeno y mejorar la tasa fotosintética (Ali *et al.* 2021). Algunos estudios, señalan que la aplicación de NPsCs mejora la actividad metabólica y el transporte de fotosintatos de manera más eficiente a través de las membranas celulares, lo que se ve reflejado en el vigor de los cultivos (Attaran-Dowom *et al.* 2022). Dicho fenómeno se asocia a la facilidad de absorción de las NPsCs por las hojas, transportadas a los tallos que mejoran el aprovechamiento de moléculas activas, incrementando el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Bakhoum *et al.* 2022). Algunos autores como Choudhary *et al.* (2017) demostraron un incremento de diámetro de tallo con tendencia similar a la de este estudio en nanopartículas de quitosán con cobre, atribuyendo el efecto a la interacción entre materiales. En este sentido, existe limitada información de la interacción de complejos de quitosán-yodo (Cs-I), sin embargo, Dávila-Rangel *et al.* (2020) demostraron que los complejos de quitosán-yodo (Cs-I) a concentraciones de 5 y 25 mg L⁻¹ de KIO₃ aumenta la biomasa total en el cultivo de lechuga.

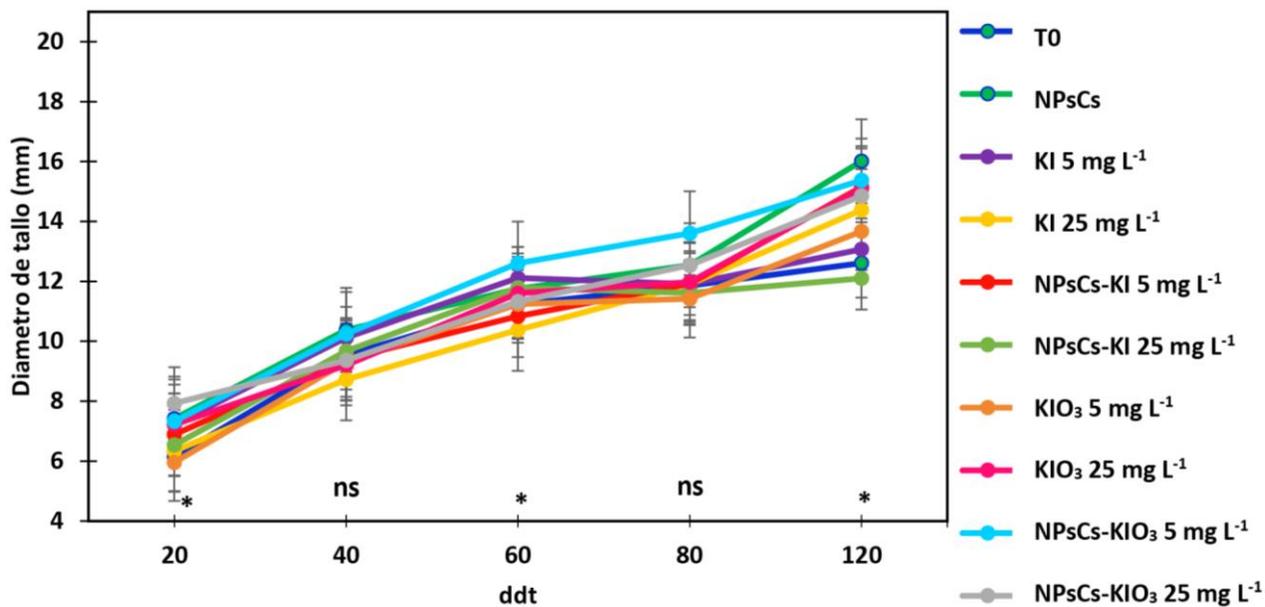


Figura 1. Diámetro de tallo en plantas de tomate tratadas con complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) aplicados foliarmente. El símbolo * indica diferencias significativas entre tratamientos y ns las diferencias no significativas (LSD, $p \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar.

Finalmente, a los 120 ddt, con ocho aplicaciones de los tratamientos, la aplicación del nanoquitosán (NPsCs) mostró un aumento del 26.96% con respecto al (T0). Por el contrario, en la variable de número de hojas no se observaron diferencias significativas con respecto al testigo absoluto (Figura 2), sin embargo, se observaron diferencias entre tratamientos a los 60 y 80 ddt. En cuanto a los tratamientos a los 60 ddt, la aplicación con NPsCs-KI con 5 mg L⁻¹ incrementó un 22.29% con respecto al tratamiento KI 25 mg L⁻¹, lo que podría indicar una mayor eficiencia del uso de nanomateriales considerando al nanoquitosán como un potencial vehículo para la retención de I (Jakhar *et al.* 2022). Dicho fenómeno, se puede atribuir al incremento en el contenido de clorofila

en las plantas, lo que les permite sintetizar más complejos para la recolección de luz, absorber más energía luminosa y mejorar la fotosíntesis (Ali *et al.* 2021). A su vez el incremento de la tasa fotosintética promueve el aprovechamiento de los fotosintatos en la formación y desarrollo de brotes nuevos (Reyes Pérez 2020). En este sentido, Malerba y Cerana (2019) mencionan que el potencial del quitosán radica en la capacidad de absorción en la epidermis de hojas y tallos, prolongando el tiempo de contacto y facilitando la absorción de las moléculas bioactivas. Así mismo, a los 80 ddt la aplicación de NPsCs-KIO₃ con 5 mg L⁻¹ incrementó el número de hojas un 27.42% con respecto al tratamiento KI 25 mg L⁻¹ que produjo el menor número de hojas al finalizar el ciclo de cultivo. El fenómeno está estrechamente relacionado con la concentración de sales empleadas, ya que la literatura indica que en valores superiores a 10 µM, dependiendo de la especie, podría representar un efecto tóxico que podría impactar en la morfología de la planta (Riyazuddin *et al.* 2022).

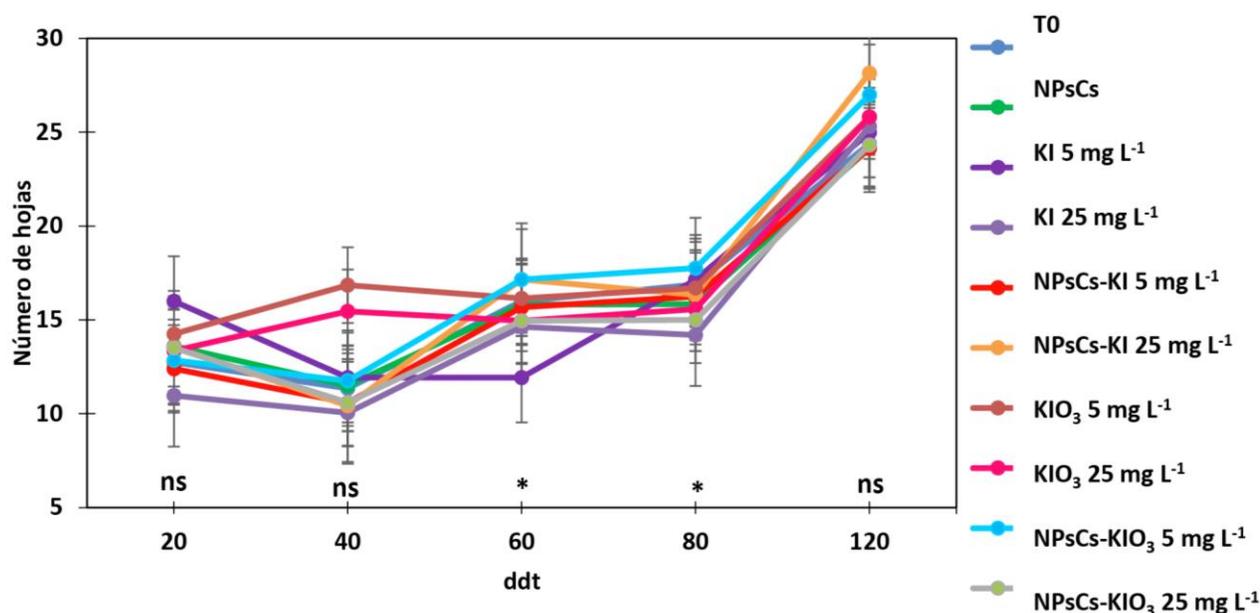


Figura 2. Número de hojas en plantas de tomate tratadas con complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) aplicados foliarmente. El símbolo * indica diferencias significativas entre tratamientos y ns las diferencias no significativas (LSD, $p \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar.

En cuanto a la altura de plantas no se observaron diferencias significativas con respecto al testigo absoluto (Figura 3). En este sentido, algunos autores, han observado efectos similares en el cultivo de tomate con aplicaciones exógenas de complejos al sustrato, donde no se observa un efecto significativo con respecto a parámetros de crecimiento en concentraciones similares a las de este estudio (Dávila-Rangel *et al.* 2020). Por otro lado, algunos estudios señalan que a una mayor concentración de KI (> 50 µM) y KIO₃ (> 400 µM) puede ser tóxica e impactar negativamente en el área foliar, la materia seca total de la planta y la altura de la planta (Incrocci *et al.* 2019). Sin embargo, en este estudio su aplicación no mostró efectos significativos durante el ciclo de cultivo, observando un crecimiento uniforme entre los tratamientos evaluados.

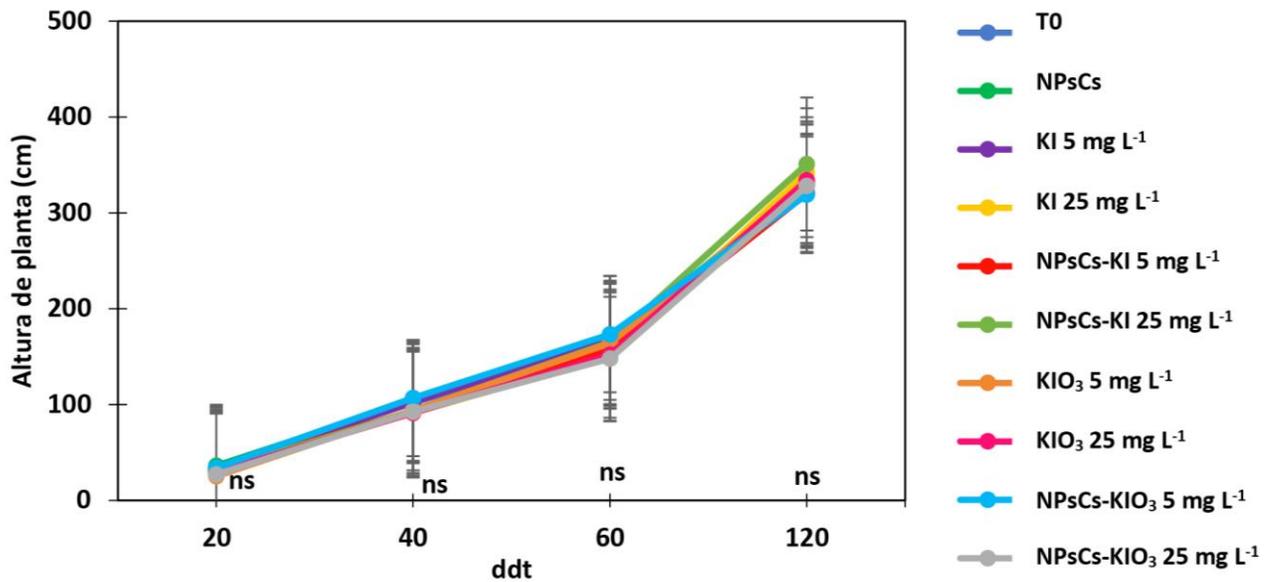


Figura 3. Altura en plantas de tomate tratadas con complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) aplicados foliarmente. El símbolo * indica diferencias significativas entre tratamientos y ns las diferencias no significativas (LSD, $p \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar.

En la Figura 4, se observan los resultados de la conductancia estomática mostrando diferencias significativas entre tratamientos a los 60 ddt. La aplicación de NPsCs-KI 25 mg L⁻¹ presentó un incremento del 36% con respecto a KIO₃ 25 mg L⁻¹, lo que podría indicar que dicho tratamiento no presentó una limitante con respecto a la medida de la velocidad de paso de CO₂ o vapor de agua a través de los estomas de la hoja, esto se relaciona con la apertura estomática en respuesta a la disponibilidad de agua desde las raíces (Bieto y Talón 2008, Carmona *et al.* 2020). Por lo anterior, el fenómeno ocurrido en los tratamientos evaluados está relacionado con incremento en el flujo de CO₂, el cual se puede asociar a un aumento en el área foliar y por consiguiente en la producción de masa seca foliar (Josefa Ruiz-Padrón 2020). Algunos autores, mencionan que las NPsCs inducen el sistema de defensa antioxidante, aumentan la producción de compuestos fenólicos, osmorreguladores y promueven el intercambio de gases en las hojas, lo que podría verse reflejado en una mejor tasa fotosintética (Bandara *et al.* 2020). Así mismo, se demostró que las NPsCs muestran una actividad antitranspirante dependiente del ácido abscísico (ABA) debido a la inducción del cierre estomático en respuesta a diversas condiciones de estrés, regulando el cierre de estomas y la expresión de genes que responden al estrés (Attaran-Dowom *et al.* 2022). Sin embargo, al término del ciclo de cultivo no se observaron diferencias significativas en esta variable, lo que podría estar relacionado a la etapa fenológica del cultivo, así como las condiciones de desarrollo del cultivo.

Variables de rendimiento

Los resultados de rendimiento del cultivo a los 120 ddt se muestran en la Tabla 1, encontrando que las plantas de tomate bajo las condiciones evaluadas lograron producir una media de 2620 g planta⁻¹, sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Autores como Dávila-Rangel *et al.* (2020) observaron que la aplicación exógena de KI y KIO₃, no afectó el rendimiento del cultivo de lechuga, tal como se observó en esta

investigación. Por otro lado, Ajiwe *et al.* (2019) observaron un incremento en el rendimiento de tomate con aplicaciones exógenas de KI y KIO₃ superiores a las de esta investigación. Algunos autores mencionan que a concentraciones de 10 y 100 μM de KIO₃ y KI en algunas especies vegetales pueden generar un impacto negativo en el rendimiento y reducir el crecimiento general de la planta (Kiferle *et al.* 2021). En cuanto al número de frutos por planta, la aplicación de NPsCs-KI con 5 mg L⁻¹ presentó un incremento del 56% con respecto a KI 25 mg L⁻¹, dicho efecto se le podría atribuir a la composición nanométrica del complejo, en este sentido algunos autores como Sathiyabama y Manikandan (2021) señalan mayor efectividad con el uso del nanoquitosán con respecto al material original, encontrando un efecto estimulante en el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En la variable de biomasa fresca y seca, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 1). Contrario con lo que se encontró en estudios anteriores Dávila-Rangel *et al.* (2020) demuestran que los complejos de quitosán-yodo (KIO₃) a concentraciones de 5 y 25 mg L⁻¹ aumentaron la biomasa total en el cultivo de lechuga. Sin embargo, los resultados obtenidos coinciden con lo observado en la variable de conductancia estomática, ya que a los 120 ddt, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, lo que indica que al no generar un incremento en el flujo de CO₂, el cual se puede asociar a un aumento en el área foliar y por consiguiente en la producción de masa seca foliar no genero un incremento en la biomasa de las plantas (Josefa Ruiz-Padrón 2020). Así mismo, autores como Caffagni *et al.* (2011) atribuyen un impacto negativo en el incremento de biomasa con aplicaciones exógenas de yodo en cultivo de tomate, debido a que en concentraciones fuera del rango óptimo representan toxicidad para las plantas lo que puede justificar el fenómeno observado. En este sentido, Fuentes *et al.* (2022) presentan resultados similares a los generados en esta investigación con aplicaciones exógenas de I en el cultivo de tomate.

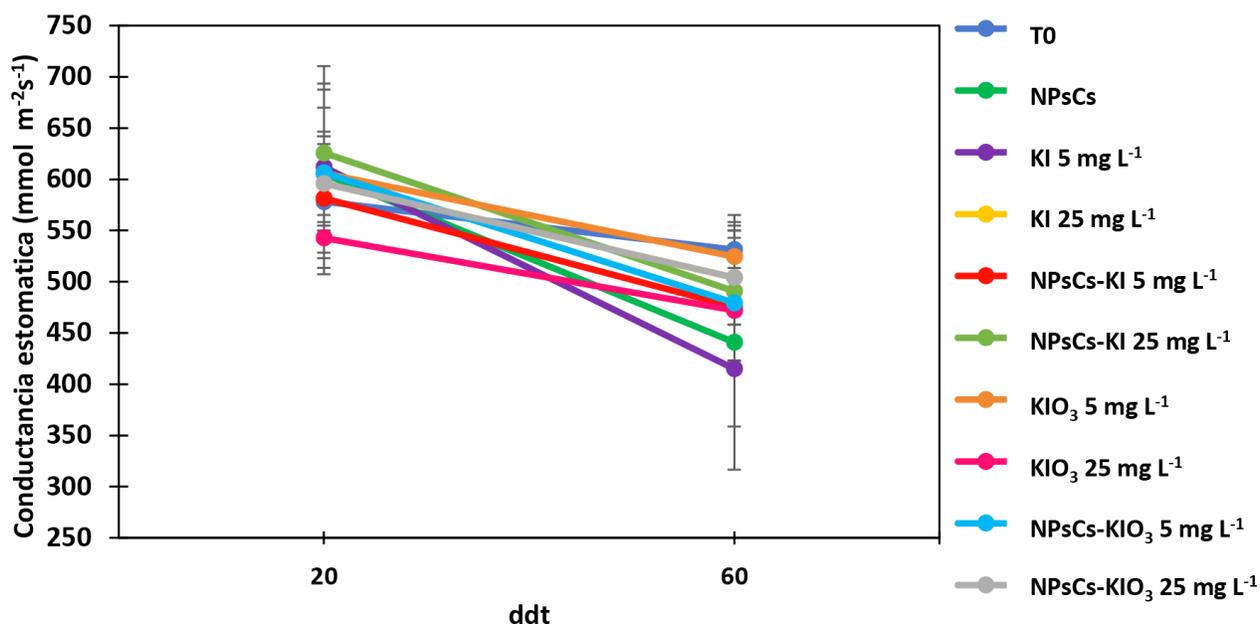


Figura 4. Conductancia estomática en plantas de tomate tratadas con complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) aplicados foliarmente. El símbolo * indica diferencias significativas entre tratamientos y ns las diferencias no significativas (LSD, $p \leq 0.05$). Las barras muestran el error estándar.

Tabla 1. Rendimiento y biomasa en plantas de tomate tratadas con complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) aplicados foliarmente.

Tratamientos	Rendimiento (g planta ⁻¹)	Número de frutos por planta	Biomasa fresca (g planta ⁻¹)	Biomasa seca (g planta ⁻¹)
T0	2778.48 ^a	36.50 ^{ab}	972.26 ^a	220.95 ^a
NPsCs	2561.22 ^a	33.20 ^{ab}	1130.76 ^a	234.44 ^a
KI 5 mg L ⁻¹	2772.31 ^a	35.10 ^{ab}	958.59 ^a	202.52 ^a
KI 25 mg L ⁻¹	2469.88 ^a	29.95 ^b	1048.42 ^a	235.64 ^a
NPsCs-KI 5 mg L ⁻¹	2308.98 ^a	48.65 ^a	863.09 ^a	216.19 ^a
NPsCs-KI 25 mg L ⁻¹	2755.47 ^a	33.05 ^{ab}	926.76 ^a	206.82 ^a
KIO ₃ 5 mg L ⁻¹	2759.52 ^a	38.80 ^{ab}	964.42 ^a	227.54 ^a
KIO ₃ 25 mg L ⁻¹	2469.88 ^a	35.40 ^{ab}	892.92 ^a	237.81 ^a
NPsCs-KIO ₃ 5 mg L ⁻¹	2790.48 ^a	38.10 ^{ab}	969.92 ^a	224.56 ^a
NPsCs-KIO ₃ 25 mg L ⁻¹	2520.10 ^a	33.70 ^{ab}	975.26 ^a	244.18 ^a

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (LSD, $p \leq 0.05$).

Se concluye que la aplicación de NPsCs y NPsCs-KIO₃ en sus dos concentraciones (5 y 25 mg L⁻¹), promovieron el aumento en el diámetro de tallo, lo que se puede traducir como un indicador del vigor de las plantas de tomate, debido a que un incremento en el diámetro de tallo implica una mayor traslocación de agua y nutrientes, promoviendo el crecimiento de las plantas. Dichos complejos representan una alternativa para la formulación de bioestimulantes que mejoren el vigor de la planta como consecuencia de la sinergia de sus componentes y la interacción con la planta.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT a través del proyecto A1-S-20923 y por el apoyo brindado por medio de la Beca con CVU 1032001 a través del programa Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida, a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y al Centro de Investigación en Química Aplicada por el apoyo recibido durante la realización de este estudio.

LITERATURA CITADA

- Ajiwe ST, Popoola AR, Afolabi CG, Oduwaye OA, Ganiyu SA, Fajinmi OB, Chikaleke VA, Imonmion JE, Adigun JA, Taiwo BF, Uzoemeka IP (2019) Effect of iodine biofortification on incidence and severity of *Fusarium* wilt and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Nigerian Journal of Biotechnology 36(1): 146-151. <https://doi.org/10.4314/njb.v36i1.19>
- Ali S, Mehmood A, Khan N (2021) Uptake, translocation, and consequences of nanomaterials on plant growth and stress adaptation. Journal of Nanomaterials 6677616: 1-17. <https://doi.org/10.1155/2021/6677616>
- Attaran-Dowom S, Karimian Z, Mostafaei-Dehnavi M, Samiei L (2022) Chitosan nanoparticles improve physiological and biochemical responses of *Salvia abrotanoides* (Kar.) under drought stress. BMC Plant Biology 22(1): 364-381. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03689-4>

- Bakhoum GS, Sadak MS, Tawfik MM (2022) Chitosan and chitosan nanoparticle effect on growth, Productivity and some biochemical aspects of *Lupinus termis* L plant under drought conditions. Egyptian Journal of Chemistry 65(5): 537–549. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.97832.4563>
- Bandara S, Du H, Carson L, Bradford D, Kommalapati R (2020) Agricultural and biomedical applications of chitosan-based nanomaterials. Nanomaterials 10(10): 1903. <https://doi.org/10.3390/nano10101903>
- Bieto JA, Talón M (2013) Fundamentos de fisiología vegetal. Publicacions i edicions universitat de Barcelona. 37p.
- Caffagni A, Arru L, Meriggi P, Milc J, Perata P, Pecchioni N (2011) Iodine fortification plant screening process and accumulation in tomato fruits and potato tubers. Communications in soil science and plant analysis 42(6): 706–718. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.550372>
- Carrillo-Sosa Y, Terry-Alfonso E, Ruiz-Padrón J (2020) Efecto de un inóculo microbiano en el crecimiento de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Cultivos Tropicales 41(4): 1-13. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362020000400001&script=sci_arttext
- Carmona S L, Villarreal-Navarrete A, Burbano-David D, Soto-Suárez M (2020) Cambios fisiológicos y mecanismos genéticos asociados a la marchitez vascular causada por *Fusarium* en tomate: una revisión actualizada. Temas Agrarios 25(2): 166-189. <https://doi.org/10.21897/rta.v25i2.2457>
- Chandra S, Chakraborty N, Panda K, Acharya K (2017) Chitosan-induced immunity in *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze against blister blight disease is mediated by nitric-oxide. Plant Physiology and Biochemistry 115: 298-307. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.008>
- Chandrasekaran M, Kim KD, Chun SC (2020) Antibacterial activity of chitosan nanoparticles: a review. Processes 8(9): 1173. <https://doi.org/10.3390/pr8091173>
- Dávila-Rangel IE, Trejo-Télez LI, Ortega-Ortiz H, Juárez-Maldonado A, González-Morales S, Companioni-González B, Cabrera de la Fuente M, Benavides Mendoza A (2020) Comparison of iodide, iodate, and iodine-chitosan complexes for the biofortification of Lettuce. Applied Science 10(7): 2378. <https://doi.org/10.3390/app10072378>
- Du-Jardin P (2015) Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Scientia Horticulturae, 196: 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Duborská E, Šebesta M, Matulová M, Zvěřina O, Urík M (2022) Current strategies for selenium and iodine biofortification in crop plants. Nutrients 14(22): 4717. <https://doi.org/10.3390/nu14224717>
- Fuentes JEG, Castellanos BFH, Martínez ENR, Ortiz WAN, Mendoza AB, Macías JM (2022) Outcomes of foliar iodine application on growth, minerals and antioxidants in tomato plants under salt stress. Folia Horticulturae 34(1): 27-37. <https://doi.org/10.2478/fhort-2022-0003>
- Incrocci L, Carmassi G, Maggini R, Poli C, Saidov D, Tamburini C, Kiferle C, Perata P, Pardossi A (2019) Iodine accumulation and tolerance in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) with green or purple leaves grown in floating system technique. Frontiers in Plant Science 10: 446748. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01494>
- Jácome-Roca A (2021) La revolución del yodo en el siglo XIX. Revista Colombiana de Endocrinología, Diabetes y Metabolismo 8(2). <https://doi.org/10.53853/encr.8.2.707>
- Jakhar AM, Aziz I, Kaleri AR, Hasnain M, Haider G, Ma J, Abideen Z (2022) Nano-fertilizers: A sustainable technology for improving crop nutrition and food security. NanoImpact 27: 100411. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100411>
- Jiménez-Gómez CP y Cecilia JA (2020) Chitosan: A natural biopolymer with a wide and varied range of applications. Molecules 25: 3981. <https://doi.org/10.3390/molecules25173981>
- Juárez-Maldonado A, Ortega-Ortiz H, Morales-Díaz AB, González-Morales S, Morelos-Moreno Á, Cabrera-De la Fuente M, Sandoval-Rangel A, Cardenas-Pliego G, Benavides-Mendoza A (2019) Nanoparticles and Nanomaterials as Plant Biostimulants. International Journal of Molecular Sciences 20(1): 162. <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>
- Kiferle C, Martinelli M, Salzano AM, Gonzali S, Beltrami S, Salvadori PA, Hora J, Holwerda HT, Scaloni A, Perata P (2021) Evidences for a nutritional role of iodine in plants. Frontiers in Plant Science 12: 616868. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
- Malerba M, Cerana R (2019) Recent applications of chitin- and chitosan-based polymers in plants. Polymers 11(5): 839. <https://doi.org/10.3390/polym11050839>

- Manikandan A, Sathiyabama M (2016) Preparation of chitosan nanoparticles and its effect on detached rice leaves infected with *Pyricularia grisea*. *International Journal of Biological Macromolecules* 84: 58-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.083>
- Ortega-Ortiz H, Alvarado-Tenorio G, Comparán-Padilla VE, Ramírez-Rodríguez SC (2022) Obtención de complejos yodados a partir de nanopartículas de quitosán y sales de yodo. *Solicitud de Patente: MX/a/2022/015150*. Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2022. <https://www.ciqa.mx/documentos/Solicitudes%20de%20Patentes%20enero%20diciembre%202022.xlsx>
- 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://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i3.1338>
- Riyazuddin R, Singh K, Iqbal N, Nisha N, Rani A, Kumar M., Khatri N, Siddiqui MH, Yasheshwar, Kim ST, Attila F, Gupta R (2022) Iodine: an emerging biostimulant of growth and stress responses in plants. *Plant and Soil* 486(1): 119-133. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05750-5>
- Sathiyabama M, Manikandan A (2021) Foliar application of chitosan nanoparticle improves yield, mineral content and boost innate immunity in finger millet plants. *Carbohydrate Polymers* 258: 117691. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117691>
- Silva-Marrufo O, Marín-Tinoco RI, Castañeda-Venegas JA (2020) Effect of potassium iodide and salicylic acid in the cultivation of hydroponic strawberries (*Fragaria* L.). *Journal-Agrarian and Natural Resource Economics* 4(7): 17-23. <https://doi.org/10.19136/era.a10n3.3851>
- Steiner AA (1961) A Universal Method for preparing untrient solutions of a certain. *Plant Soil* 15:134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Tanya-Morocho M, Leiva-Mora M (2019) Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro agrícola* 46(2): 93-103. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v46n2/0253-5785-cag-46-02-93.pdf>
- Yu J, Wang D, Geetha N, Khawar KM, Jogaiah S, Mujtaba M (2021) Current trends and challenges in the synthesis and applications of chitosan-based nanocomposites for plants: A review. *Carbohydrate Polymers* 261: 117904. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117904>