

EVALUACIÓN DEL EFECTO SINÉRGICO DE QUITOSANO/ÓXIDO DE ZINC/NANOTUBOS DE CARBONO MULTIPARED/FRUCTANOS SOBRE LA MORFOMETRÍA DEL TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)

EVALUATION OF THE SYNERGISTIC EFFECT OF CHITOSAN/ ZINC OXIDE/ MULTIWALL CARBON NANOTUBES/ FRUCTANS ON TOMATO MORPHOMETRIC (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)

Castellano-Castellanos Rigoberto S.¹, Cortés-Martínez Carlos I.², Lopez-Lopez Guillermo³,
Navarro-Ibarra Diana C.⁴, Román-Doval Ramón^{5*}

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, rigoberto.castellanos@itvalletla.edu.mx ,
<https://orcid.org/0009-0002-5555-6391>

²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, carlos.cm@itvalletla.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-1328-3372>

³Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, guillermo.ll@itvalletla.edu.mx, <https://orcid.org/0009-0000-1656-7544>

⁴Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, diana.ni@itvalletla.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2154-6371>

^{5*}Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, rdoval.11@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2495-1719> (Autor para la correspondencia)

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i2.422>

Resumen -- Convencionalmente, la agricultura presenta múltiples problemas, como la lixiviación y la volatilización química de los compuestos utilizados durante el desarrollo de los cultivos. Desafortunadamente, el abuso incontrolado de estos ha sido causa de múltiples problemas ambientales. Este abuso ha llevado a que las dosis de fertilización, incluso las que cumplen con los requerimientos del cultivo, resulten insuficientes para su desarrollo. Por lo tanto, se evaluó el diseño de una formulación basada en compuestos gelatinizantes como el quitosano con nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), nanotubos de carbono multipared (MWCNT) y fructanos (Frut) para su uso como nanofertilizante. Los resultados generales mostraron un efecto sinérgico entre el quitosano, los MWCNT y los fructanos, así como notables valores morfométricos en plantas tratadas con quitosano, MWCNT y ZnO. Se esperaba que la formulación quitosano/ZnO/MWCNT/Frut presentara una gran

sinergia entre ellos para potenciar sus propiedades originales. Sin embargo, se observó una disminución en su efecto, posiblemente debido a la interacción química entre los componentes, que no proporcionó una buena biodisponibilidad para las plantas de tomate. El tratamiento que registró el mayor efecto sinérgico en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L., variedad Moctezuma F1) fue el quitosano reactivo, MWCNT/frut, logrando un incremento del 90.6% en el diámetro basal, 76.5% en la altura de la planta, 81.25% en el número de hojas, 309.38% en el peso fresco, 201.4% en el peso seco, 14% en la longitud de la raíz y 212.69% en el área foliar, en comparación con el tratamiento control.

Palabras Clave—Quitosano, Nanofertilizante, Nanotubos de Carbono, Agricultura, Fructanos.

Abstract -- Conventionally, agriculture involves multiple problems, such as the leaching and

chemical volatilization of compounds used during the development of crops. Unfortunately, the uncontrolled abuse of these has been the cause of multiple problems at the environmental level. This abuse has led to the fact that fertilization doses, even those that comply with the requirements of the crop, can become insufficient for its development. Therefore, the design of a formulation based on gelatinizing compounds such as chitosan with nanoparticles of zinc oxide (ZnO), multiwall carbon nanotubes (MWCNT), and fructans (Frut) were evaluated for their use as a nanofertilizer. Overall results showed a synergistic effect between chitosan, MWCNT, and fructans as well as remarkable morphometric values in plants treated with chitosan, MWCNT, and ZnO. The chitosan/ZnO/MWCNT/Frut formulation was expected to have a great synergy between them in order to potentiate its original properties. However, there was a decline in its effect, this may be due to the chemical interaction between the components that could not provide good bioavailability for tomato plants. The treatment that registered the highest synergistic effect in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L., variety Moctezuma F1) was reactive grade chitosan, MWCNT/frut, achieving an increase of 90.6% in basal diameter, 76.5% in plant height, 81.25% in number of sheets, 309.38% in fresh weight, 201.4% in dry weight, 14% in root length and 212.69% in leaf area compared to control treatment.

Key words– Chitosan, Nano-fertilizer, Carbon Nanotubes, Agriculture, Fructans.

INTRODUCCIÓN

Las nanopartículas desempeñan un papel importante en la agricultura, donde su integración en productos cotidianos

revoluciona la producción agrícola, controla las enfermedades de las plantas, mejora la calidad de los cultivos y el rendimiento de las plantas destinadas a la alimentación [1]. También participan en la mejora de la germinación de las semillas y actúan como agentes antimicrobianos [2]. Recientemente, ha aumentado el interés por explorar el potencial de los nanotubos de carbono para influir en el desarrollo vegetal. Este entusiasmo se debe a su capacidad para penetrar las paredes celulares de las plantas, lo que permite la administración inteligente y el nanotransporte en la agricultura [3]. Además, los nanotubos de carbono se muestran prometedores como fertilizantes con una doble función: sirven como fuente de nutrientes de liberación lenta y como estimulantes del crecimiento vegetal [4, 5]. Las investigaciones indican que el tratamiento de semillas con nanotubos de carbono multipared (MWCNT) puede mejorar el crecimiento de los cultivos al aumentar la elongación de brotes y raíces, la biomasa y los índices de vigor tras ser absorbidos a través de las raíces y transportados al tallo [6].

Las nanopartículas de óxido de zinc son eficaces para aumentar el rendimiento y el crecimiento de los cultivos alimentarios [7], abordar la deficiencia de zinc y mejorar la resiliencia de las plantas al estrés ambiental [8]. Además, las investigaciones sugieren que las nanopartículas de óxido de zinc pueden impulsar la productividad y el crecimiento de los cultivos alimentarios al mejorar la germinación de las semillas y prevenir enfermedades [7]. Por otro lado, el quitosano puede inducir diversas respuestas en las plantas según su estructura, concentración, especie y etapa de desarrollo. El primer estudio sobre los efectos estimulantes en plantas de guisante (*Pisum sativum* L.) y tomate (*S. lycopersicum* L.) reveló su capacidad para mejorar los mecanismos de defensa contra el estrés abiótico y biótico. La suplementación con quitosano también desencadenó un estallido oxidativo inicial y la acumulación de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en diversas plantas y

cultivos celulares vegetales [9]. En los últimos años, los fructanos han atraído la atención debido a sus singulares propiedades químicas, físicas, bioquímicas y tecnológicas [10]. Específicamente, las aplicaciones agrícolas de los fructanos se relacionan con sus funciones, ampliamente investigadas, en la mitigación del estrés biótico y abiótico [11]. En vista de lo anterior, nuestro objetivo es obtener información valiosa sobre el efecto sinérgico del quitosano, el óxido de zinc (ZnO), los fructanos y los nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) en la promoción del crecimiento, la longitud de la raíz, la altura, la biomasa, el diámetro basal y el área foliar de las plantas de *S. lycopersicum*.

DESARROLLO

Material

La semilla de tomate utilizada fue de la variedad Moctezuma F1. Esta variedad presenta una producción temprana, frutos de excelente firmeza y vida útil con un alto potencial de rendimiento.

Se emplearon dos tipos de quitosano: quitosano de grado reactivo (bajo peso molecular), obtenido de Sigma-Aldrich México, y quitosano de grado agrícola, obtenido de “Panvo Orgnic Pvt. Ltd”. Los fructanos utilizados se obtuvieron de la Hacienda ORO DE AGAVE, México.

Los polvos de ZnO utilizados para el experimento se sintetizaron en nuestro laboratorio mediante el método de precipitación homogénea. Una descripción más detallada de este proceso se ilustra en el trabajo de Herrera [12].

Los nanotubos de carbono multipared (MWCNT) se sintetizaron, purificaron y oxidaron en nuestro laboratorio mediante el método de deposición química de vapor (CVD) y se trataron con concentrado ácido, respectivamente. Este proceso se detalla con más detalle en el trabajo de Román [13].

Preparación de la solución de quitosano

La solución de quitosano se preparó en un matraz aforado de 1000 ml. Se añadieron 5 g de quitosano (grado agrícola y grado reactivo, respectivamente), 990 ml de agua

destilada y 10 ml de ácido acético. Posteriormente, se agitó durante aproximadamente 90 min para homogeneizar.

Preparación y esterilización del suelo

El suelo utilizado para este experimento se preparó y esterilizó de la siguiente manera: de acuerdo con las Reglas Internacionales para el Análisis de Semillas de 2016 (Reglas ISTA 2016), la esterilización se realizó en dos ciclos, con un intervalo de 12 h entre el primero y el segundo. El suelo se esterilizó en autoclave bajo las siguientes condiciones de trabajo: 121 °C y 15 kPa, con temperatura y presión constantes durante el proceso. Finalmente, el suelo se secó en un horno a 40 °C durante 3 días.

Protocolo de Tratamiento de Semillas

En todos los experimentos se utilizaron semillas de tomate (*S. lycopersicum*, variedad Moctezuma F1). Las semillas se mantuvieron a temperatura ambiente hasta su uso. Antes del experimento, se esterilizaron superficialmente mediante un tratamiento de 10 minutos con una solución de hipoclorito (10 % v/v) y se enjuagaron tres veces con agua destilada. Se utilizó el método de flotación para determinar la viabilidad de las semillas antes de la siembra. Tras la esterilización, las semillas se trataron con soluciones de ácido acético, quitosano y nanotubos de carbono. En la muestra de control, las semillas se trataron con agua destilada. Las concentraciones de cada componente en las soluciones utilizadas en el tratamiento se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Concentraciones empleadas para cada componente.

Componentes	Concentración
Quitosano	Solución al 0.5%
Nanotubos de pared múltiple	100 mgL
Oxido de Zinc	10.5 mgL
Fructanos	5000 mgL

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado, con un arreglo factorial 3x4 con cuatro repeticiones. En la Tabla 2, se describen los tratamientos experimentales. Las semillas de *S. lycopersicum* se trataron con cada tratamiento mediante recubrimiento y se colocaron a una temperatura constante de 25 °C sin iluminación.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos.

Nomenclatura	Componentes
Control	Agua
Q-R	Quitosano grado reactivo
Q-A	Quitosano grado agrícola
Q-R/Frut	Quitosano grado reactivo + fructanos
Q-R/MWCNT	Quitosano grado reactivo + nanotubos de carbono de pared múltiple
Q-R/ZnO	Quitosano grado reactivo + óxido de zinc
Q-A/Frut	Quitosano grado agrícola + fructanos
Q-A/MWCNT	Quitosano grado agrícola + nanotubos de carbono de pared múltiple
Q-A/ZnO	Quitosano grado agrícola + óxido de zinc
Q-R/MWCNT/Frut	Quitosano grado reactivo + nanotubos de carbono de pared múltiple + fructanos
Q-R/MWCNT/ZnO	Quitosano grado reactivo + nanotubos de carbono de pared múltiple + óxido de zinc
Q-R/ZnO/Frut	Quitosano grado reactivo + óxido de zinc + fructanos
Q-A/MWCNT/Frut	Quitosano grado agrícola + nanotubos de carbono de pared múltiple + fructanos
Q-A/MWCNT/ZnO	Quitosano grado agrícola + nanotubos de carbono de pared múltiple + óxido de zinc
Q-A/ZnO/Frut	Quitosano grado agrícola + óxido de zinc + fructanos
Q-R/MWCNT/ZnO/Frut	Quitosano grado reactivo + nanotubos de carbono de pared múltiple + óxido de zinc + fructanos
Q-A/MWCNT/ZnO/Frut	Quitosano grado agrícola + nanotubos de carbono de

pared múltiple + óxido de zinc + fructanos

Parámetros medidos

Los parámetros medidos fueron longitud de raíz, altura, diámetro basal, peso fresco, peso seco, número de hojas y área foliar de las plantas de tomate.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza. La significancia de las diferencias se estimó y comparó mediante la prueba T con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ ($P\leq 0,05$). Finalmente, todos los análisis estadísticos se realizaron con el software SAS versión 9.4M8 (2023) y se editaron con OriginPro 9.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis de Resultados

Biomasa, crecimiento y morfología de las plantas

Las semillas de tomate se trataron con una serie de diferentes combinaciones de quitosano (reactivo y de grado agrícola), ZnO, nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) y fructanos (Frut) como un grupo único o combinado. Los valores morfométricos fueron mayores en las plantas tratadas con Q-R/MWCNT/Frut, alcanzando valores notables tanto en el diámetro basal (valor DB de 1,7 cm) como en la altura de la planta (valor AP de 78 cm), seguido del tratamiento Q-A/ZnO/Frut (valor DB de 1,21 cm y valor AP de 75 cm) en comparación con el control (valor DB de 0,91 cm y valor AP de 44 cm). Los datos revelan además que la adición de óxido de zinc al quitosano de grado agrícola muestra valores notablemente mayores de DB y AP, registrando valores de 1,4 cm y 52 cm, respectivamente, en comparación con el quitosano de grado agrícola puro (valor DB de 1,1 cm y valor AP de 44 cm). Sin embargo, la adición de ZnO al quitosano reactivo mostró una disminución tanto del diámetro basal como de la altura de la planta (valor de DB de 0,83 cm y valor de AP de 52 cm) en comparación con el rendimiento del tratamiento Q-R (valor de DB de 1,19 cm y valor de AP de 55 cm).

(Figuras 1b y c). Además, el análisis estadístico muestra que el tratamiento Q-R mejoró significativamente ($P \leq 0,05$) la longitud de la raíz (16 cm), en comparación con el grupo control (14 cm). Sin embargo, se observó una disminución significativa al incorporar fructanos y óxido

de zinc al quitosano reactivo. La longitud de las raíces también fue significativamente mayor en los tratamientos Q-R/MWCNT/Frut y Q-A/MWCNT/ZnO, alcanzando 15,9 cm y 15,8 cm, respectivamente (Figura 1a).

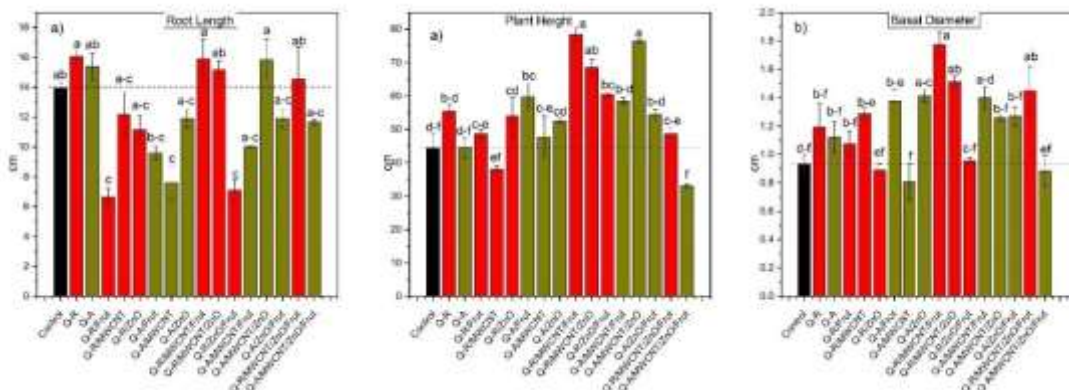


Figura 1. Efectos de diversos tratamientos sobre (a) la longitud de la raíz, (b) la altura de la planta y (c) el diámetro basal en plantas de tomate tras el recubrimiento de las semillas. Cada valor representa el valor de los triplicados y cada réplica consistió en cuatro muestras de plantas. Las barras de error representan $\pm SE$ (error estándar).

Se midió la biomasa vegetal, y los análisis estadísticos muestran un mayor rendimiento en las plantas tratadas con Q-R/MWCNT/Fruto (peso fresco de 0,35 g y peso seco de 0,030 g), seguidas del tratamiento con Q-A/MWCNT/ZnO (peso fresco de 0,28 g y peso seco de 0,032 g). Sin embargo, en comparación con el tratamiento control (peso fresco de 0,06 g y peso seco de 0,010 g), la combinación Q-A/MWCNT/ZnO/Fruto provocó una disminución significativa tanto en el peso fresco (0,05 g) como en el peso seco (0,005 g) (Figuras 2a y b). También se midieron parámetros morfológicos como el número de hojas y el área foliar, y los datos revelan que el tratamiento Q-A/MWCNT/ZnO alcanzó los valores máximos tanto en número de hojas (6,5 hojas) como en área foliar (65 cm²), seguido del tratamiento Q-A/Fruto (6,2 hojas y un área foliar de 62 cm²). Sin embargo, el área foliar y el número de hojas se vieron afectados de forma insignificante por las plantas

tratadas con Q-A/MWCNT/ZnO/Fruto en comparación con el control (Figs. 3a y b).

Discusiones

El objetivo del presente estudio fue revelar los efectos interactivos entre el quitosano (grado reactivo y grado agrícola), ZnO, nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) y fructanos (Frut) como grupos individuales o combinados en el crecimiento de *S. lycopersicum*. Aunque hay pocos informes disponibles que evalúen el efecto sinérgico entre quitosano/óxido de zinc y nanotubos de carbono/óxido de zinc [14], hasta la fecha, no hay estudios disponibles que evalúen los efectos interactivos entre el quitosano, el óxido de zinc y los nanotubos de carbono de pared múltiple, y menos aún los efectos de los fructanos en el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, el presente estudio es un estudio novedoso de nanofertilizantes de la propuesta de quitosano, óxido de zinc, nanotubos de carbono de pared múltiple y fructanos.

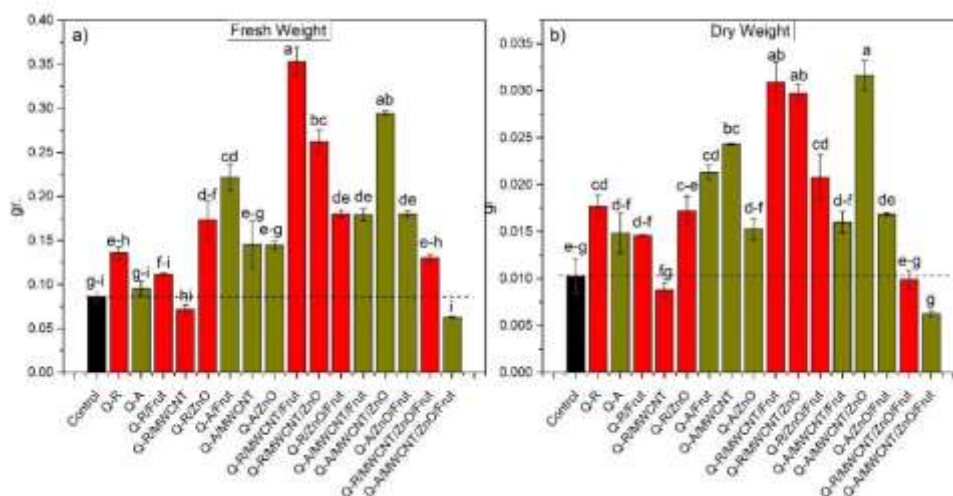


Figura 2. Estudio de la biomasa vegetal bajo diferentes tratamientos (a) Peso fresco, (b) Peso seco. Cada valor corresponde al valor de triplicados y cada réplica consistió en cuatro muestras de plantas. Las barras de error representan $\pm$ SE (error estándar).

Se ha demostrado que los nanotubos de carbono tienen efectos tanto positivos como negativos en el crecimiento de las plántulas de especies de plantas superiores. Según informes, los nanotubos de carbono aumentaron el porcentaje de germinación y mejoraron el crecimiento de las plántulas de tomate [15]. Sin embargo, no se observó ningún impacto de los nanotubos de carbono en el desarrollo ni la fisiología de las plantas de trigo y colza [16]. En otro estudio, los nanotubos de carbono tuvieron un impacto negativo en el crecimiento de *A. thaliana* [17]. Además, se ha demostrado que los nanotubos de carbono pueden mejorar el porcentaje de germinación de las semillas mediante diversos mecanismos. En primer lugar, los nanotubos de carbono pueden mejorar la absorción y retención de agua, creando así un microambiente favorable para la germinación [18]. Los nanotubos de carbono también estimulan la actividad hormonal de las plantas, promoviendo la liberación de la

latencia de las semillas y acelerando la germinación [15]. En este estudio, observamos que la mayoría de los tratamientos, incluyendo los nanotubos de carbono, tuvieron un efecto estimulante sobre el diámetro basal, la altura, el número de láminas, el área foliar y la biomasa de la planta. Sin embargo, en algunos casos, la inclusión de nanotubos de carbono provocó una disminución en la longitud de las raíces, como se observó en las plantas tratadas con Q-R/MWCNT y Q-A/MWCNT. Todas estas discrepancias pueden deberse a la aglomeración de nanotubos de carbono, modificaciones de la superficie radicular o respuestas específicas de la especie [15, 19]. Además, los nanotubos de carbono pueden aumentar la acumulación de contaminantes, lo que podría explicar el mayor efecto sinérgico.

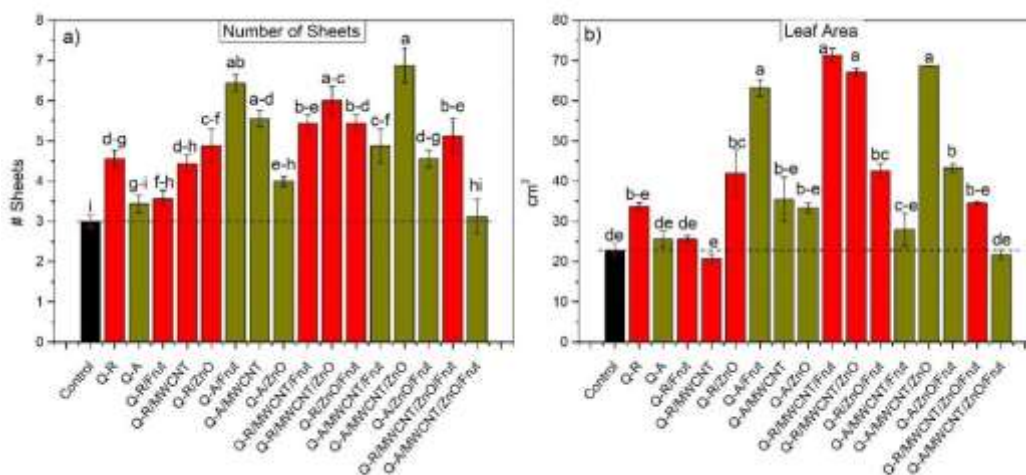


Figura 3. Estudio morfológico de las plantas bajo diferentes tratamientos (a) Número de hojas y (b) Área foliar. Cada valor es la media de triplicados y cada réplica consistió en cuatro muestras de plantas. Las barras de error representan $\pm$ SE (error estándar).

De manera similar, el quitosano ha mostrado varias propiedades que se pueden aplicar en cultivos hortícolas, particularmente como un potenciador del crecimiento de las raíces de las plantas; sin embargo, estas propiedades dependen principalmente de su peso molecular [20]. Algunos informes han enfatizado la eficiencia del quitosano de bajo peso molecular en el desarrollo de las plantas. Por ejemplo, cuando se recubre con quitosano de bajo peso molecular, la colza (*Brassica chinensis*) exhibió un índice de germinación favorable, crecimiento de las plántulas y longitud de la raíz. Además, Mahdavi y Rahimi [21] informaron que el porcentaje de germinación, la tasa de germinación y el índice de vigor de las plántulas se vieron significativamente afectados por el pretratamiento de las semillas con quitosano. Sin embargo, también se ha informado que el tipo de grado del quitosano también juega un papel fundamental en los parámetros de crecimiento de las plantas. En este contexto, los oligosacáridos de quitosano se consideran un promotor del crecimiento de las plantas de amplio espectro; La aplicación de quitosano de grado agrícola aumentó tanto la altura (33,5 %) de las plántulas de café como el rendimiento de biomasa (9,2 %) [22].

Otro estudio indicó que los tratamientos con soluciones de quitosano de grado agrícola promovieron

significativamente la tasa de crecimiento de la altura de la planta en orégano griego; sin embargo, no hubo un efecto significativo en la materia fresca ni en el rendimiento de las partes aéreas del orégano [23]. Con respecto al quitosano de grado reactivo, los estudios sugieren que posee un gran efecto promotor del crecimiento en algunos parámetros como la altura de la planta, la longitud de la raíz, el número de raíces y el diámetro del tallo [24].

Nuestros resultados mostraron un mejor desempeño en los parámetros de crecimiento vegetal al utilizar quitosano de grado reactivo en comparación con los tratamientos con quitosano de grado agrícola. Por ejemplo, el tratamiento con quitosano de grado reactivo mostró una mejora significativa en la longitud de la raíz, la longitud de la planta y el diámetro basal. Además, mostró un mayor efecto sinérgico en combinación con nanotubos de carbono. Esto se debe a que este tipo de quitosano se somete a un proceso de modificación química para aumentar su solubilidad y reactividad, lo que le permite formar enlaces covalentes con otros compuestos, como nutrientes y fitohormonas, facilitando su absorción por las plantas. Por otro lado, el quitosano de grado agrícola es menos procesado y puede contener impurezas como proteínas y sales; estas

impurezas pueden limitar su actividad biológica y su efecto en las etapas iniciales del crecimiento vegetal. Sin embargo, no se debe subestimar el potencial del quitosano de grado agrícola como estimulador del desarrollo radicular, así como para mejorar la estructura del suelo y las etapas de desarrollo y producción.

El zinc es un micronutriente esencial para las plantas, y su disponibilidad puede influir significativamente en su crecimiento y producción de biomasa. El ZnO, como fuente de zinc, desempeña un papel vital en el metabolismo y el desarrollo de las plantas. Se ha reportado que aumenta el peso fresco y seco en plantas como zanahorias, arroz y tomates [25, 26]. Los efectos beneficiosos del ZnO sobre la biomasa podrían estar relacionados con el efecto positivo del zinc en el balance mineral y un mejor suministro de nutrientes a la planta, gracias a su participación en la síntesis de clorofila, la activación enzimática, la regulación hormonal, la absorción de nutrientes y la modulación del estrés oxidativo. De acuerdo con lo establecido previamente, los resultados de la presente investigación indicaron que la mayoría de los tratamientos con ZnO mejoraron la biomasa de las plantas de tomate, así como su altura total.

Por otro lado, aproximadamente el 15% de las plantas con flores utilizan fructanos como carbohidratos de reserva [27]. Diversas familias de plantas almacenan productos fotosintéticos como fructanos en sus vacuolas, en lugar de almidón en los plástidos. Esta adaptación facilita sus estrategias de supervivencia en el hábitat [28]. En este sentido, Hendry y Wallace [29] reconocieron que los fructanos ofrecen protección contra el estrés vegetal. Sugirieron que las regiones caracterizadas por temperaturas y climas áridos presentaban abundancia de plantas ricas en fructanos, mientras que las zonas tropicales carecían por completo de ellos. Desde entonces, los fructanos han sido ampliamente reconocidos por su capacidad para proporcionar tolerancia a las plantas frente al estrés

biótico y abiótico [11, 30]. En este contexto, el presente estudio reveló que la incorporación de fructanos favoreció las defensas de la planta. Específicamente, la mayor respuesta se obtuvo en plantas tratadas con Q-R/MWCNT/Frut, que, como se puede observar al analizar el peso seco, este tratamiento registró la mayor cantidad de pérdidas, este fenómeno podría deberse a que las plantas liberan la mayoría de las reservas que tienen para sobrevivir en condiciones de estrés y, como los fructanos son ampliamente reconocidos por ser una fuente principal de reservas en las plantas, es considerable sugerir que los fructanos ayudan a las plantas a regular su dinamismo para evitar condiciones extremas. Sin embargo, existe una tendencia a que los fructanos afecten negativamente el crecimiento de las plantas, como se ilustra en la disminución de la longitud de la raíz de la planta cuando se trataron con Q-A/Frut y Q-R/Frut, esta limitación podría deberse a que ambos se consideran fuentes de energía y reservas de nutrientes, ya que los fructanos son utilizados principalmente por los microorganismos en el suelo, ambos restringen sus acciones beneficiosas entre sí una vez que interactúan con el suelo. Sin embargo, un efecto positivo en el crecimiento de las plantas se puede lograr con la inclusión de nanotubos de carbono ya que, en este caso, el quitosano y los fructanos actúan como un canal que favorece la distribución eficiente y equilibrada de nutrientes, lo que permite que las plántulas de tomate potencien su vigor radicular.

CONCLUSIONES

En este estudio, se demostró que la combinación quitosano/MWCNT/Frut y quitosano/MWCNT/ZnO tiene un efecto sinérgico en la germinación de las semillas, el establecimiento de las raíces, la absorción de nutrientes y el rendimiento general de la planta. Los efectos combinados incluyeron una mejora en parámetros de crecimiento como la altura de la planta, la longitud de la raíz, la biomasa, el área foliar y el

diámetro basal de la planta. Sin embargo, en la combinación quitosano/ZnO/MWCNT/Frut, el efecto sinérgico se redujo; esto podría deberse a que la interacción química entre los componentes no proporciona una buena biodisponibilidad para las plantas. No obstante, es importante realizar más investigaciones para determinar las concentraciones óptimas, las interacciones químicas, la liberación, los métodos de aplicación y los posibles impactos ambientales.

Las líneas de trabajo futuras podrían centrarse en:

*Optimizar las concentraciones y proporciones de quitosano, MWCNT, ZnO y Frut para maximizar los efectos sinérgicos encontrados en las variables de crecimiento vegetal. Para ello es necesario diseñar estudios experimentales controlados para definir las mejores condiciones de formulación y evaluar la respuesta fisiológica en las plantas y la biodisponibilidad de nutrientes en distintos suelos. De esta manera, se podrían desarrollar protocolos estandarizados para su aplicación reproducible y eficiente en sistemas agrícolas.

*Además, es importante establecer una línea de investigación para evaluar los efectos ambientales y toxicológicos de la mezcla de estos materiales. Estos estudios deberían considerar la liberación controlada de los compuestos, la persistencia y movilidad de los nanomateriales en el suelo y su interacción con la microbiota y el ciclo de nutrientes. Paralelamente, es aconsejable desarrollar ensayos a campo para verificar la seguridad, eficacia y sostenibilidad de estas formulaciones y así desarrollar estrategias agrícolas innovadoras de bajo riesgo ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Aslani F, Bagheri S, Muhd JN, Juraimi AS, Hashemi FSG, Baghdadi A. Effects of engineered nanomaterials on plants growth: An overview. *Sci World J.* 2014;2014:1–28. doi:10.1155/2014/641759.

[2] Parveen J, Sultana T, Kazmi A, Malik K, Ullah A, Ali A, Qayyum B, et al. Phytosynthesized nanoparticles as novel antifungal agent for sustainable agriculture: A mechanistic approach, current advances, and future directions. *J Nanotechnol.* 2023;2023:1–16. doi:10.1155/2023/8011189.

[3] Kwak SY, Lew TTS, Sweeney CJ, Koman VB, Wong MH, Bohmert-Tatarev K, Snell KD, et al. Chloroplast-selective gene delivery and expression in planta using chitosan-complexed single-walled carbon nanotube carriers. *Nat Nanotechnol.* 2019;14:447–55. doi:10.1038/s41565-019-0375-4.

[4] Rajput VD, Singh A, Minkina T, Rawat S, Mandzhieva S, Sushkova S, Shuvaeva V, et al. Nano-enabled products: Challenges and opportunities for sustainable agriculture. *Plants.* 2021;10:2727. doi:10.3390/plants10122727.

[5] Vithanage M, Seneviratne M, Ahmad M, Sarkar B, Ok YS. Contrasting effects of engineered carbon nanotubes on plants: A review. *Environ Geochem Health.* 2017;39:1421–39. doi:10.1007/s10653-017-9957-y.

[6] Chen J, Zeng X, Yang W, Xie H, Ashraf U, Mo Z, Liu J, et al. Seed priming with multiwall carbon nanotubes (MWCNTs) modulates seed germination and early growth of maize under cadmium (Cd) toxicity. *J Soil Sci Plant Nutr.* 2021;21:1793–805. doi:10.1007/s42729-021-00480-6.

[7] Sabir S, Arshad M, Chaudhari SK. Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: Synthesis and applications. *Sci World J.* 2014;2014:1–8. doi:10.1155/2014/925494.

[8] Rizwan M, Ali S, Ali B, Adrees M, Arshad M, Hussain A, Zia ur Rehman M, et al. Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere.* 2019;214:269–77. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.09.120.

- [9] Farouk S, Amany A. Improving growth and yield of cowpea by foliar application of chitosan under water stress. *Egypt J Biol.* 2012;14:14–26. doi:10.4314/ejb.v14i1.2.
- [10] Wang M, Cheong KL. Preparation, structural characterisation, and bioactivities of fructans: A review. *Molecules.* 2023;28:1613. doi:10.3390/molecules28041613.
- [11] Joudi M, Ahmadi A, Mohamadi V, Abbasi A, Vergauwen R, Mohammadi H, Van den Ende W. Comparison of fructan dynamics in two wheat cultivars with different capacities of accumulation and remobilization under drought stress. *Physiol Plant.* 2012;144:1–12. doi:10.1111/j.1399-3054.2011.01517.x.
- [12] Herrera R, Olvera ML, Maldonado A. Synthesis of ZnO nanopowders by the homogeneous precipitation method: Use of Taguchi's method for analyzing the effect of different variables. *J Nanomater.* 2017;2017:1–9. doi:10.1155/2017/4595384.
- [13] Román R, Morales J, Olayo R, Escamilla V, Uribe M, Ortega M. Evaluation of nanoparticles of hydroxyapatite and MWCNT's in scaffolds of poly lactic acid. *Mater Res Express.* 2016;3:125402. doi:10.1088/2053-1591/3/12/125402.
- [14] Kumar V, Sachdev D, Pasricha R, Maheshwari PH, Taneja NK. Zinc-supported multiwalled carbon nanotube nanocomposite: A synergism to micronutrient release and a smart distributor to promote the growth of onion seeds in arid conditions. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2018;10:36733–45. doi:10.1021/acsami.8b13464.
- [15] Khodakovskaya M, Dervishi E, Mahmood M, Xu Y, Li Z, Watanabe F, Biris AS. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano.* 2009;3:3221–7. doi:10.1021/nn900887m.
- [16] Larue C, Pinault M, Czarny B, Georgin D, Jaillard D, Bendiab N, Mayne-L'Hermite M, et al. Quantitative evaluation of multi-walled carbon nanotube uptake in wheat and rapeseed. *J Hazard Mater.* 2012;227–228:155–63. doi:10.1016/j.jhazmat.2012.05.033.
- [17] Ke M, Ye Y, Zhang Z, Gillings M, Qu Q, Xu N, Xu L, et al. Synergistic effects of glyphosate and multiwall carbon nanotubes on *Arabidopsis thaliana* physiology and metabolism. *Sci Total Environ.* 2021;769:145156. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145156.
- [18] Cañas JE, Long M, Nations S, Vadan R, Dai L, Luo M, Ambikapathi R, et al. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environ Toxicol Chem.* 2008;27(9):1922–31. doi:10.1897/08-117.1.
- [19] Lin C, Fugetsu B, Su Y, Watari F. Studies on toxicity of multi-walled carbon nanotubes on *Arabidopsis T87* suspension cells. *J Hazard Mater.* 2009;170:578–83. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.05.025.
- [20] Román R, Torres SP, Tenorio AY, Gómez A, Valencia AA. Chitosan: Properties and its application in agriculture in context of molecular weight. *Polymers.* 2023;15:2867. doi:10.3390/polym15132867.
- [21] Mahdavi B, Rahimi A. Seed priming with chitosan improves the germination and growth performance of ajowan. *EurAsian J Biosci.* 2013;7:69–76. doi:10.5053/ejobios.2013.7.0.9.
- [22] Dzung NA, Khanh VTP, Dzung TT. Research on impact of chitosan oligomers on biophysical characteristics, growth, development and drought resistance of coffee. *Carbohydr Polym.* 2011;84:751–5. doi:10.1016/j.carbpol.2010.07.066.
- [23] Yin H, Fretté XC, Christensen LP, Grevsen K. Chitosan oligosaccharides promote the content of polyphenols in Greek oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*). *J Agric Food Chem.* 2012;60:136–43. doi:10.1021/jf204376j.
- [24] Sharma G, Kumar A, Devi KA, Prajapati D, Bhagat D, Pal A, Raliya R, Biswas P, et al. Chitosan nanofertilizer to foster source activity in maize. *Int J Biol*

Macromol. 2020;145:226–34.
doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.12.155.

[25] Faizan M, Faraz A, Yusuf M, Khan ST, Hayat S. Zinc oxide nanoparticle-mediated changes in photosynthetic efficiency and antioxidant system of tomato plants. Photosynthetica. 2018;56:678–86. doi:10.1007/s11099-017-0717-0.

[26] Singh A, Prasad SM, Singh S. Impact of nano ZnO on metabolic attributes and fluorescence kinetics of rice seedlings. Environ Nanotechnol Monit Manag. 2018;9:42–9. doi:10.1016/j.enmm.2017.11.006.

[27] Ritsema T, Smeekens S. Fructans: Beneficial for plants and humans. Curr Opin Plant Biol. 2003;6:223–30. doi:10.1016/S1369-5266(03)00034-7.

[28] Yoshida M. Fructan structure and metabolism in overwintering plants. Plants. 2021;10:933. doi:10.3390/plants10050933.

[29] Hendry G, Wallace RM, Suzuki N, Chatterton. The origin, distribution and evolutionary significance of fructans. Boca Raton: CRC Press; 1993.

[30] Livingston DP, Premakumar R, Tallury SP. Carbohydrate partitioning between upper and lower regions of the crown in oat and rye during cold acclimation and freezing. Cryobiology. 2006;52:200–8. doi:10.1016/j.cryobiol.2005.11.001.

Supervisión	Lopez-Lopez Guillermo, Román-Doval Ramón (Grado de contribución, igual)
Administración del proyecto	Román-Doval Ramón, Navarro-Ibarra Diana C. (Grado de contribución, igual)
Visualización de datos	Román-Doval Ramón



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

Tabla de Roles de Contribución

Roles	Autor (es)
Conceptualización	Castellano-Castellanos Rigoberto S, Román-Doval Ramón. (Grado de contribución, igual)
Metodología	Castellano-Castellanos Rigoberto S, Cortés-Martínez Carlos I. (Grado de contribución, igual)
Análisis formal	Cortés-Martínez Carlos I., Lopez-Lopez Guillermo (Grado de contribución, igual)
Redacción – borrador original	Castellano-Castellanos Rigoberto S, Navarro-Ibarra Diana C. (Grado de contribución, igual)
Redacción – revisión y edición	Cortés-Martínez Carlos I., Lopez-Lopez Guillermo, Román-Doval Ramón (Grado de contribución, igual)