

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Biofortificación del Cultivo de Melón (*Cucumis melo L.*) Mediante la Aplicación
Foliar de Nanopartículas de Quitosán-Yodo

Por:

MARIO CARRASCO MALPICA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Biofortificación del Cultivo de Melón (*Cucumis melo* L.) Mediante la Aplicación
Foliar de Nanopartículas de Quitosán-Yodo

Por:

MARIO CARRASCO MALPICA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Asesor principal


Dra. Hortensia Ortega Ortiz
Asesor principal externo


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coasesor


Ing. Gerardo Rodríguez Galindo
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2025

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Saltillo, Coahuila, junio 2025

El autor que es responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citar; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo es original.

Autor principal



Mario Carrasco Malpica

Asesor principal



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por brindarme una formación académica y humana que hoy me permiten avanzar con convicción en mi desarrollo como profesionista.

Al **Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)**, por darme la oportunidad de integrarme a su equipo de trabajo, por el aprendizaje adquirido y por el ambiente de colaboración que me permitió crecer tanto personal como profesionalmente.

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT)** por el apoyo otorgado a través del financiamiento del proyecto A1-S-20923.

A la **Dra. Hortensia Ortega Ortiz**, mi más sincero agradecimiento por todo el apoyo constante, su orientación y su paciencia durante el desarrollo de esta investigación y durante mi estancia en CIQA.

Al **Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente**, por su confianza y respaldo, elemento clave para la consolidación de este trabajo.

A la **Dra. Rocío Peralta Manjarrez**, por su disposición, apoyo y atención brindados a lo largo del proceso de investigación.

A **MC. Selene Yañez Martínez**, por confiar en mí y permitirme formar parte del desarrollo de esta investigación. Agradezco profundamente su acompañamiento, sus enseñanzas y el afecto con el que siempre me trató.

A la **MC. Fabiola Yaneth Castellanos Padilla** por su valioso apoyo y enseñanza en la síntesis de las nanopartículas de quitosán durante mi estancia en el CIQA.

Al **Dr. Eduardo Alfonso Treviño López** por su apoyo en diversas técnicas de campo

Al **LCQ Jesús Alejandro Espinosa Muñoz** del laboratorio de caracterización de Materiales del CIQA, por su asistencia técnica en la determinación de minerales mediante espectroscopía ICP.

A todos mis profesores, quienes con su dedicación y compromiso formaron parte esencial de mi formación académica. Gracias por cada enseñanza impartida a lo largo de esta etapa universitaria.

DEDICATORIA

Agradezco a Dios, fuente de vida, sabiduría y fortaleza, por haberme guiado y sostenido a lo largo de este camino. Sin su guía y bendición, este logro no habría sido posible.

A mi familia, por ser mi pilar fundamental, mi inspiración y mi mayor apoyo. Gracias por su amor incondicional, por su fe en mí y por acompañarme en cada paso de esta travesía.

Dedico este trabajo, con el corazón lleno de gratitud, a las personas que han sido mi fuerza, mi inspiración y mi sostén en este camino.

A mis padres, **María Gloria Malpica Muñoz** y **Mario Carrasco Mazón**, por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A **Luis Ramos Duarte**, quien ha sido una figura paterna en mi vida por su presencia constante, por su apoyo incondicional y por estar siempre dispuesto a darme lo mejor de sí.

A mi hermana, **Chelsea Ramos Malpica**, quien ha sido mi motor constante, mi alegría en los días difíciles y mi mayor impulso para seguir adelante.

A mis abuelas, **María Reyna Muñoz Real** y **Antonia Mazon Rojas**, por su cariño y apoyo que siempre han sido un refugio para mí.

A mi tío **Genaro Carrasco Rojas**, por su respaldo incondicional durante toda mi carrera. Su fe en mí ha sido una luz en los momentos de incertidumbre.

A mis tías y tíos, **Lucero Carrasco, Daniela Carrasco, Paula Muñoz, Adela Muñoz y Noé Carrasco**, tanto materno como paterno, por su compañía, palabras de aliento y presencia a lo largo de este trayecto.

A mis primos, por ser parte de mis raíces y mis recuerdos.

A **José Lorenzo Sandoval**, por su compañía, su cariño y su apoyo constante en esta etapa tan importante de mi vida.

A mi comunidad de **Nuevo Soyaltepec**, por confiar en mí, por su respaldo durante mi estancia en España, este logro también es suyo.

A mis amigos del intercambio académico en España, **Mariana Ordaz, Violeta Guerrero, Carolina Magdaleno, Marisol Botello y Julián Ruíz**, gracias por las vivencias compartidas, los consejos sinceros y por recorrer conmigo el otro lado del mundo.

A mis amigos de la universidad, **Dulce Gayri, Aranza Casillas, Judith Álvarez, David Ricardo Alcázar, Berenice Mejía** por su amistad, apoyo y compañía en esta etapa universitaria.

A todos ustedes, les dedico este logro con humildad, cariño y eterno agradecimiento

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	4
DEDICATORIA	6
ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL	I
ÍNDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. HIPÓTESIS.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes del cultivo de melón	3
2.2. Descripción Botánica	3
2.3. Producción Mundial y Nacional.....	4
2.5. El quitosán como bioestimulante de cultivos	5
2.6. Función del yodo en las plantas.....	6
2.7. Importancia del yodo en la dieta humana	6
2.8. Biofortificantes	8
2.9. Nanopartículas de quitosán-yodo como biofortificantes.....	8
2.10. Dosis y etapas de aplicación	9
2.11. Vías de aplicación recomendadas	10
2.12. Impacto de las nanopartículas de yodo en la producción y calidad de hortalizas	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3.1. Ubicación del experimento.....	12
3.2. Material vegetal utilizado.....	12
3.3. Manejo agronómico del cultivo.....	12
3.4. Determinación de las variables Morfológicas	14

3.5. Variables de calidad.....	14
3.6. Diseño experimental utilizado	15
Tabla 1. Tratamientos aplicados en el experimento del cultivo melón.....	15
3.7. Análisis estadístico de datos.....	16
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
4.1. Longitud del tallo	17
4.2. Diámetro del tallo	17
4.3. Variables de Calidad: Diámetro del Fruto	19
4.4. Número de frutos por planta	20
4.5. Peso del Fruto.....	21
4.6. Rendimiento	22
4.7. Contenido de sólidos solubles totales (°Brix)	24
4.8. Firmeza del Fruto	25
4.9. Contenido de Yodo	26
V. CONCLUSIONES.....	29
VI. LITERATURA CITADA.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos aplicados en el experimento del cultivo de melon..... **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre la longitud del tallo principal de plantas de melón.....	17
Figura 2. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el diámetro del tallo de plantas de melón.....	18
Figura 2. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el diámetro del tallo de plantas de melón.....	19
Figura 3. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el tamaño del fruto de melón.	20
Figura 4. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el número de frutos por planta de melón.....	21
Figura 5. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el peso promedio del fruto de melón.	22
Figura 6. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el rendimiento por planta de melón.	23
Figura 7. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el contenido de sólidos solubles totales en el fruto de melón.....	25
Figura 8. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre la firmeza del fruto de melón.	26

RESUMEN

En este estudio se evaluó el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de quitosán-yodo (NPsCS-I) sobre el comportamiento agronómico, la calidad comercial y el contenido de yodo en frutos de melón (*Cucumis melo* L.). Los tratamientos evaluados constaron de Testigo absoluto, sales de yoduro y yodato de potasio a las dosis de 5 ppm y 10 ppm, NPsCS, NPsCS-KIO₃, NPsCS-KI a las dosis de 250 ppm y 500 ppm, respectivamente. Para la cual se empleó un diseño completamente al azar con un total de 9 tratamientos y 10 repeticiones por tratamiento. De los resultados obtenidos se observó que la aplicación de las nanopartículas de quitosán, yoduro de potasio y yodato de potasio mejoraron significativamente la longitud y el diámetro del tallo, número de frutos, peso promedio y rendimiento por hectárea en comparación con el testigo y las formas inorgánicas de yodo. También se observaron incrementos en sólidos solubles totales y firmeza del fruto, atributos clave para la calidad poscosecha. El contenido de yodo en el fruto no mostró diferencias estadísticas relevantes entre tratamientos, lo que indica que el efecto biofortificante directo no fue concluyente. Se corrobora parcialmente la hipótesis planteada. Los resultados resaltan el potencial de las NPsCS-I como estrategia para incrementar la productividad y calidad del melón, con aplicaciones prometedoras en la biofortificación en sistemas hortícolas.

PALABRAS CLAVE: biofortificación, *Cucumis melo* L., nanopartículas, quitosán, productividad, yoduro, yodato.

ABSTRACT

This study evaluated the effect of foliar application of chitosan-iodine nanoparticles (NPsCS-I) on the agronomic performance, commercial quality, and iodine content of melon fruits (*Cucumis melo* L.). The evaluated treatments included an absolute control, potassium iodide and potassium iodate salts at doses of 5 ppm and 10 ppm, NPsCS, NPsCS-KIO₃, and NPsCS-KI at concentrations of 250 ppm and 500 ppm. A completely randomized design was used, with a total of 9 treatments and 10 replicates per treatment. The results showed that the application of chitosan nanoparticles, potassium iodide, and potassium iodate significantly improved stem length and diameter, number of fruits, average fruit weight, and yield per hectare compared to the control and inorganic iodine treatments. Increases in total soluble solids and fruit firmness were also observed, which are key attributes for postharvest quality. Iodine content in the fruit did not show significant statistical differences among treatments, indicating that the direct biofortifying effect was not conclusive. The initial hypothesis was partially confirmed. The results highlight the potential of NPsCS-I as a strategy to increase melon productivity and quality, with promising applications in biofortification within horticultural systems.

KEYWORDS: Biofortification, *Cucumis melo* L., chitosan, iodide, iodate, nanoparticles, productivity.

I. INTRODUCCIÓN

La producción del cultivo de melón (*Cucumis melo* L.) es una de las especies hortícolas de mayor importancia económica a nivel nacional y global, debido a su alta demanda (FAO, 2023). En México su producción supera las 627 mil toneladas anuales, los estados que destacan son: Coahuila, Sonora, Durango, Michoacán y Guerrero, siendo Coahuila entidad líder en producción para el abastecimiento nacional e internacional (SIAP, 2023). Su manejo agronómico requiere innovación constante para mantener rendimientos competitivos y calidad comercial.

La calidad comercial está determinada por sólidos solubles totales, firmeza, tamaño y vida poscosecha, parámetros que dependen del equilibrio nutricional durante el ciclo productivo. La biofortificación con micronutrientes, como el yodo, puede incrementar tanto el valor nutricional como la aceptación del mercado (Priyashantha *et al.*, 2025; Seymen *et al.*, 2025; Osuji *et al.*, 2025)

La nanotecnología permite el uso de nanocompuestos que promueven la absorción de nutrientes y protección contra factores bióticos y abióticos, su aplicación facilita una liberación controlada de bioactivos que mejoran la disponibilidad nutrimental en cultivos hortícolas (Thakur & Yadav, 2025; Pabbati *et al.*, 2025)

El yodo es un micronutriente esencial para la salud humana, cuya deficiencia afecta la síntesis de hormonas tiroideas. Su aplicación biofortificante en los productos agrícolas puede reducir deficiencias nutricionales en la población humana al aumentar su presencia en alimentos vegetales y mejorando la calidad del fruto (Priyashantha *et al.*, 2025; TEC, 2025)

Es por esto que surge la necesidad de evaluar el efecto de las nanopartículas de quitosán-yodo en la biofortificación del melón, esto permitirá comprender su efecto acumulativo en la calidad y rendimiento del cultivo. La propuesta busca evaluar si existe una correlación entre dicha suplementación de interés nutricional, bajo condiciones controladas que simulan la realidad del entorno agrícola, además, contribuirá a la biofortificación de cultivos con potencial para abordar problemas de salud pública asociados a deficiencias nutricionales.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento agronómico y la biofortificación con yodo en el fruto de melón mediante la aplicación foliar de las nanopartículas de quitosán-yodo (NPsCS-I).

1.2. Objetivos Específicos

Determinar el efecto de la aplicación de las NPsCS-I y la fuente de yodo, sobre el rendimiento agronómico en el ciclo productivo del cultivo de melón.

Evaluar la calidad comercial del cultivo del melón por la aplicación de las NPsCS-I.

Determinar la biofortificación con yodo en el fruto de melón.

1.3. HIPÓTESIS

La aplicación foliar de las nanopartículas de quitosán-yodo tendrán un efecto biofortificante en el fruto de melón en función de los compuestos de yodo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes del cultivo de melón

El melón (*Cucumis melo* L.), perteneciente a la familia *Cucurbitaceae*, representa una de las especies hortícolas más relevantes desde el punto de vista agronómico y económico, su domesticación tiene centro de origen en regiones tropicales de África y Asia (Paris, 2015). Esta especie, caracterizada por su hábito de crecimiento herbáceo y rastrero, ha adquirido relevancia agronómica ya que se trata de una especie monóica, además presenta un comportamiento climatérico con un incremento notable en la tasa respiratoria y síntesis de etileno durante la fase de maduración, proceso que incide directamente en la calidad poscosecha y vida de anaquel del fruto (Upadhyay, 2020). Entre los distintos grupos variables el grupo de los cantalupensis destaca por su mayor importancia económica para la producción comercial a nivel mundial son frutos de tamaño variable, con un peso que oscila entre 1.5-2.2 Kg (Wehner *et al.*, 2020). La popularidad de este grupo ha llevado a nuevas estrategias de manejo nutricional y fisiológico para incrementar la productividad y calidad de esta misma.

2.2. Descripción Botánica

Cucumis melo L. es una especie perteneciente a la familia *Cucurbitaceae*, con crecimiento rastrero (Radouane *et al.*, 2021). Es una planta con un ciclo anual con un sistema radicular pivotante, con raíces secundarias que optimizan la absorción de nutrientes y permiten explorar eficientemente el perfil del suelo tallo herbáceo, trepador, rastrero cubierto por tricomas con presencia de zarcillos que facilitan el anclaje, una característica que incide directamente en su manejo agronómico (Lecholochole *et al.*, 2022).

Las hojas dispuestas de manera alterna, poseen un peciolo largo y una lámina palmatilobada con márgenes dentado características que facilitan la captación de luz un aspecto determinante para su rendimiento fotosintético y una superficie

cubierta por tricomas la cual reduce la pérdida de agua por transpiración y contribuye a la tolerancia en condiciones de estrés hídrico (Da Silva *et al.*, 2021; Soltani 2021).

Las flores, de corta vida útil, color amarillo, con inflorescencias axilares monoicas, aunque algunos genotipos expresan flores hermafroditas (Pechar *et al.*, 2024). La polinización, esencial para la formación del fruto, depende principalmente de insectos polinizadores como abejas y abejorros (Messellem *et al.*, 2024)

El fruto, clasificado botánicamente como una pepónide, presenta una gran variabilidad en forma, tamaño, coloración de la epidermis que puede ser lisa, reticulada o rugosa y textura de la pulpa con alto contenido de azúcares y compuestos bioactivos de interés nutricional y comercial, características influenciadas por factores bióticos y abióticos. La cavidad central contiene numerosas semillas ovaladas, de color crema a marrón, embebidas en un tejido placentario mucilaginoso. La madurez fisiológica del fruto se asocia con cambios en la firmeza, el incremento en el contenido de sólidos solubles y la emisión de compuestos volátiles, indicadores clave para la cosecha (Torres Quezada, 2023; Zhang *et al.*, 2016)

2.3. Producción Mundial y Nacional

A nivel global, el melón (*Cucumis melo* L.) es uno de los cultivos frutícolas más importantes, con una producción anual que supera los 31 millones de toneladas, China lidera la producción mundial posicionándose como principal productor seguido por Turquía, India e Irán (FAO, 2023). En el contexto nacional México representa, cada año más de 627 mil toneladas cosechadas, los estados que destacan son Coahuila, Sonora, Durango, Michoacán y Guerrero, destacando el estado de Coahuila como principal productor a nivel nacional (SADER, 2023), en el 2021 México ocupó el octavo lugar en producción mundial, actualmente se encuentra en el décimo segundo (SADER, 2023), el melón más comercializado a nivel nacional y mayor producción en más de 23 estados de la República Mexicana es de tipo Cantaloupe (SIAP 2023).

2.4. La nanotecnología en la agricultura

La implementación de nanomateriales en la agricultura representa un avance tecnológico para mejorar la producción y el rendimiento de los cultivos (Khan *et al.*, 2021). Esta innovación se fundamenta en la capacidad de manipular estructuras a escala micrométrica, permitiendo el desarrollo de soluciones eficientes para mejorar los diversos sistemas de producción sin poner en riesgo al medio ambiente. (López-Maldonado, 2023). Las pérdidas productivas asociadas a diversas plagas y patógenos alcanzan rangos críticos entre el 20 % y el 40 % del rendimiento de los cultivos anualmente (Cabral-Pinto *et al.*, 2020). La nanotecnología es una alternativa a esta problemática mediante formulaciones de nanomateriales que reducen la dependencia de agroquímicos convencionales, minimizándolos. (Shang *et al.*, 2019).

2.5. El quitosán como bioestimulante de cultivos

Dentro de las estrategias modernas orientadas al fortalecimiento fisiológico de las plantas, el empleo de bioestimulantes en la producción de plantas representa una alternativa eficaz para optimizar el desempeño fisiológico de los cultivos. Estos compuestos al interactuar con los tejidos vegetales, inducen procesos fisiológicos que favorecen la absorción de nutrientes, incrementa la tolerancia ante factores de estrés biótico y abiótico, y promueven mejoras en la calidad de frutos y, en consecuencia, contribuyen al incremento del rendimiento productivo (Rivera-Solís, *et al.*, 2024).

El quitosán ha tomado importancia como uno de los bioestimulantes más prometedores. Se trata de un biopolímero de origen natural que se obtiene a partir de la quitina, presente en el caparazón de crustáceos, en ciertas estructuras celulares de los hongos y en el exoesqueleto de diversos insectos (Bauer *et al.*, 2022) Su aplicación en plantas no solo estimula procesos de defensas, sino que también actúa como elicitador vegetal, estimulando la producción de fitoalexinas,

compuestos antimicrobianos que forman parte de los mecanismos de defensa de las plantas. Asimismo, contribuye a la protección contra enfermedades al inhibir el desarrollo de microorganismos patógenos (Yu *et al.*, 2021).

2.6. Función del yodo en las plantas

El yodo (I) es un elemento esencial en la nutrición humana, sin embargo, en las plantas se considera un elemento benéfico para las plantas y bioestimulante (Treviño-Ruiz *et al.*, 2024). El uso de yoduro de potasio (KI) y yodato de potasio (KIO_3) es una opción viable para mejorar los procesos fisiológicos y bioquímicos en plantas agrícolas (Ramírez-Rodríguez, *et al.* 2025), Algunos estudios han demostrado efectividad en la acumulación de I en la producción de cultivos con aplicaciones foliares y al sustrato mostrando 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.*, 2023). Se ha demostrado que la aplicación exógena de yodo en forma de yoduro, yodato o compuestos orgánicos conjugados induce las actividades tanto enzimáticas como no enzimáticas, que ayudan a contrarrestar el estrés oxidativo inducido por agentes bióticos y abióticos. (Medrano-Macías *et al.*, 2016)

2.7. Importancia del yodo en la dieta humana

El yodo (I) es un micronutriente esencial que participa directamente en la biosíntesis de las hormonas tiroideas tiroxina y triyodotironina, las cuales son fundamentales para el correcto funcionamiento del organismo humano. Estas hormonas ejercen una influencia decisiva en el desarrollo y regulación del sistema nervioso, además de intervenir en el desempeño fisiológico de órganos vitales como el hígado, los riñones, los músculos y el cerebro, su adecuada presencia en la dieta es clave para mantener procesos metabólicos normales y un desarrollo neurológico óptimo (Lee, 2021). A nivel global, se estima que entre el 35-45% de la población presenta deficiencia de yodo (I), lo que representa un problema de salud pública significativo

debido a las implicaciones que conlleva en el desarrollo físico y neurológico, especialmente en etapas tempranas de la vida (Aparo *et al.*, 2023).

Las recomendaciones nutricionales establecen que la ingesta diaria de yodo debe ajustarse según la etapa de desarrollo y las condiciones fisiológicas de cada individuo, se sugiere una dosis de 90 µg diarios para niños de entre 1 y 8 años, mientras que para aquellos entre 9 y 13 años, la cantidad recomendada es de 120 µg. a partir de los 14 años, tanto hombres como la mayoría de mujeres, la ingesta óptima asciende a 150 µg diarios, durante el periodo de lactancia, esta necesidad aumenta a 290 µg por día, debido a la mayor demanda fisiológica del oligoelemento (Hatch-McChesney & Lieberman, 2022).

Una de las estrategias recomendadas por la organización mundial de la salud (WHO por sus siglas en inglés) para prevenir y controlar la deficiencia de yodo en la población humana ha sido la yodación de la sal de mesa. sin embargo, con el transcurso del tiempo, esta medida ha enfrentado cuestionamiento debido al aumento en el consumo excesivo de sal, cual se ha asociado con diversos problemas de salud pública, como enfermedades cardiovasculares y trastornos metabólicos, lo que ha llevado a reconsiderar su implementación como única vía de suplementación (World Health Organization [WHO], 2020). Ante la creciente preocupación por la deficiencia de yodo en la población mundial, una estrategia prometedora para abordar esta problemática es la biofortificación de cultivos comestibles. Esta técnica consiste en mejorar la calidad nutricional de los alimentos vegetales mediante el incremento de nutrientes esenciales como el yodo (Kyriacou & Rouphael, 2018). En particular, la biofortificación con yodo no solo permite enriquecer la cadena alimentaria con este micronutriente, sino que también fortalecer los sistemas de defensa de las plantas al favorecer la detoxificación de radicales libres y aumentar la producción de compuestos antioxidantes, tanto enzimáticos como no enzimáticos, capaces de mitigar el estrés oxidativo causado por factores bióticos y abióticos (Ramírez-Gottfried *et al.*, 2023). Además, se ha observado que el yodo aplicado a los cultivos puede mejorar el crecimiento vegetal

y potenciar la capacidad antioxidante, aunque estos efectos dependen de la fuente utilizada, su concentración y el método de aplicación. (Halka *et al.*, 2020; Sabatino *et al.*, 2021). Un beneficio adicional de esta técnica es que el yodo biofortificado en las plantas suele encontrarse en formas orgánicas, las cuales presentan una mayor biodisponibilidad y estabilizador en comparación con las sales inorgánicas, que tienden a volatilizarse (Dávila-Rangel *et al.*, 2020). Así, la biofortificación representa una vía eficiente y sostenible para mejorar la nutrición humana mediante la mejora del contenido de yodo en alimentos de origen vegetal (Krzepiłko *et al.*, 2019).

2.8. Biofortificantes

La biofortificación es un proceso para mejorar el valor nutricional de los cultivos de importancia alimentaria, ya sea mediante el incremento del contenido o la biodisponibilidad de nutrientes, utilizando métodos agronómicos específicos (Buturi *et al.*, 2021). Este enfoque agronómico tiene relevancia al considerar que aproximadamente 2000 millones de personas a nivel global presentan deficiencias de minerales como hierro, zinc y yodo, según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022). Esta estrategia se posiciona como una alternativa viable para enriquecer los productos agrícolas con nutrientes fundamentales de minerales en el metabolismo humano, adoptando diferentes métodos durante el procesamiento (Govindaraj, 2015). Los objetivos de esta práctica es aumentar la concentración del contenido de minerales u otros compuestos bioactivos en órganos comestibles directos como frutos y hortalizas contribuyendo así a la mejora de la salud humana. (Chinnici, *et al.*, 2023). Entre los enfoques disponibles la biofortificación en prácticas agronómicas destacan por su eficiencia, a nivel vegetal mediante técnicas accesibles y de bajo costo (Wang *et al.*, 2017).

2.9. Nanopartículas de quitosán-yodo como biofortificantes

Las nanopartículas de quitosán (NPSCS) son una alternativa prometedora en sistemas de producción hortícola, debido a su doble función como bioestimulantes naturales en la agricultura sustentable y agentes fitoprotectores (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2023). Su mecanismo de acción puede aplicarse en diversos

campos desde la inducción de respuestas inmunológicas sistémicas en plantas hasta la inhibición directa de patógenos mediante actividad antibacteriana, antifúngica, y antiviral, de amplio espectro (Ingle *et al.*, 2022). Esta versatilidad funcional también se complementa con características físico-químicas destacables como alta estabilidad coloidal y facilidad de síntesis, factores que favorecen su adopción a escala productiva (Maluin & Hussein, 2020). En el cultivo de melón, la aplicación de NPsCS suplementadas con yodo genera modificaciones fisiológicas que incrementan los antioxidantes naturales en los cultivos, lo cual puede generar beneficios para la salud humana (Ketnawa *et al.*, 2022). Estos cambios bioquímicos se correlacionan con mejoras morfológicas cuantificables en parámetros de crecimiento vegetativo y desarrollo reproductivo, particularmente en condiciones de estrés abiótico.

2.10. Dosis y etapas de aplicación

En investigaciones enfocadas con nanopartículas de quitosán-yodo en el cultivo de melón el momento y la dosis de aplicación son factores determinantes, en estudios recientes se emplearon dosis de 5 y 25 mg kg⁻¹ de complejos de quitosán yodado (CS-KI y CS-KIO₃), aplicadas foliarmente en etapas poscosecha, específicamente durante el desarrollo de fruto. Estos tratamientos permitieron mejorar el contenido de compuestos nutraceuticos como carotenoides, vitamina C, fenólicos y la capacidad antioxidante total, favoreciendo además la conservación poscosecha por hasta 15 días a temperatura ambiente sin comprometer la calidad (Ortega-Ortiz *et al.*, 2023).

Por otra parte, investigaciones con nanopartículas de óxido de zinc en melón emplearon un rango de dosis más amplio, desde 50 hasta 250 mg L⁻¹, siendo 200 mg L⁻¹ la dosis óptima para incrementar el rendimiento y la concentración de zinc en la pulpa, mientras que dosis intermedias como 50 o 100 mg L⁻¹ favorecieron la acumulación de compuestos bioactivos, lo que sugiere una relación dosis-respuesta específica para distintos objetivos fisiológicos (Rivera-Gutiérrez *et al.*, 2021).

Aunque los compuestos y elementos varían, la efectividad depende significativamente de la concentración empleada y del momento de aplicación.

En estudios con (NPsCS) aplicadas en cultivos hortícolas como tomate y lechuga, se observó que dosis de 0.2 a 0.8 mg mL⁻¹ fueron efectivas para mejorar el rendimiento, la firmeza y la concentración de compuestos bioactivos, siendo las dosis medias adecuadas para efectos integrales sobre la fisiología de la planta, mientras que las dosis más altas promovieron la síntesis de compuestos antioxidantes y enzimas relacionadas con el estrés (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2023; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2024). Estas observaciones indican que, en el caso del cultivo de melón, el uso de NPsCS-I podría beneficiarse de un enfoque similar, con aplicaciones en etapas de crecimiento del fruto y ajustes de dosis de acuerdo al parámetro a optimizar, ya sea calidad nutracéutica o rendimiento.

2.11. Vías de aplicación recomendadas

La aplicación foliar es de las más utilizada debido a su rápida absorción estomática y cuticular, lo que facilita la translocación hacia órganos de interés como hojas y frutos (Riseh *et al.*, 2024). Alternativamente, la fertirrigación con NPs permite una liberación gradual en la raíz, mejorando la disponibilidad de yodo en suelos con baja capacidad de intercambio catiónico (Caro-León, *et al.*, 2019). En sistemas hidropónicos, la solución nutritiva directa ha demostrado incrementar la asimilación de micronutrientes y la actividad enzimática relacionada con la síntesis de compuestos bioactivos (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2023).

2.12. Impacto de las nanopartículas de yodo en la producción y calidad de hortalizas

La aplicación de nanopartículas de quitosán-yodo en el sistema de producción agrícola ha revolucionado el manejo nutricional de cultivos hortícolas principalmente en la biofortificación y protección fitosanitaria, mejorando la eficiencia de uso del yodo en plantas logrando mayores concentraciones de este oligoelemento, este

incremento asocia directamente con mejoras en el valor nutricional de los frutos aportándoles este micronutriente esencial (El-Ramady *et al.*, 2023). Diversas investigaciones han señalado que el empleo de NPsCS-I, actúan como bioestimulantes naturales, capaces de potenciar el rendimiento y al mismo tiempo enriquecer la calidad nutricional del producto, elevar los niveles de compuestos antioxidantes, azúcares solubles y otro metabolismo con valor funcional. (Rivera-Solís *et al.*, 2024; Treviño-Ruiz *et al.*, 2024). Este tipo de suplementación es una alternativa innovadora y sustentable para una agricultura más resiliente.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del experimento

El experimento de investigación se realizó en el periodo abril-agosto del 2024, bajo condiciones de un invernadero tipo capilla de mediana tecnología el cual consta de ventiladores, pared húmeda y ventanas laterales, ubicado en el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con sede en el municipio de Saltillo, Coahuila, bajo las siguientes coordenadas 25° 23'36" N, 101°00'02" O. Las temperaturas en los meses de abril-agosto oscilaron entre los 24-30°C, la humedad relativa osciló entre 40 y 60 %.

3.2. Material vegetal utilizado

El material genético de melón que se utilizó fue la variedad Sweet Sunrise de la casa comercial SYNGENTA®. Esta variedad produce frutos de tamaño regular, calidad consistente, buen sabor, cavidad pequeña y cerrada, larga vida de anaquel, resistencia intermedia al pulgón del algodón, la planta es vigorosa ideal para trasplante en etapa intermedia-tardía.

3.3. Manejo agronómico del cultivo

Siembra y manejo de plántula: esta actividad fue realizada en una charola de poliestireno color blanca con 150 cavidades, utilizando una mezcla de Peat moss® y perlita® a una proporción de 70:30, en cada cavidad se colocó una semilla de melón, la charola se mantuvo en un invernadero tipo capilla de mediana tecnología el cual consta de ventiladores, pared húmeda y ventanas laterales del departamento de Horticultura en la UAAAN. Una vez obtenida la emergencia de las plantas se procedió a realizar los riegos utilizando una solución nutritiva Steiner al 5 %, y concluyendo con una concentración del 15 % de la misma solución, la frecuencia del riego con la solución nutritiva fue con intervalos de 48 horas. El manejo sanitario puede verse en aplicaciones preventivas mediante el fungicida a base de sulfato de cobre (Cuperhidro®) en una dosis de 500 g/ha, en una sola aplicación a los 10 días posteriores a la emergencia. Para evitar la incidencia de plagas, se realizaron dos

aplicaciones del producto comercial Bralic® en una dosis de 1 L/ha., a los 15 y 25 días después de la emergencia como forma preventiva sobre la invasión de insectos chupadores.

Trasplante. cuando la plántula tenía un sistema radicular bien desarrollado y una longitud de 12 cm acompañada de tres hojas verdaderas, se realizó a los 32 días después de la siembra. El trasplante fue realizado en bolsas de polietileno color negro de capacidad de ocho litros, en donde contenía un sustrato de peat moss® y perlita® en una proporción 70:30 respectivamente, para realizar esta acción se preparó una solución con fungicida Bluetrack® de la casa comercial BioStar, se utilizó 1ml de fungicida/litro de agua para sumergir las plántulas antes del trasplante a fin de evitar el desarrollo de alguna enfermedad.

Riego. Esta actividad se realizó manualmente y considerando las condiciones del ambiente de crecimiento del cultivo se inició con un volumen de 0.5 litros de agua por maceta, por un periodo de 15 días posteriores al trasplante, en tanto que en la etapa de crecimiento vegetativo pleno se incrementó el volumen a 1.0 litros por maceta, en tanto que en el cuajado frutos la cantidad de agua ascendió a 1.5 litros y en la etapa de llenado de frutos la cantidad de agua suministrada fue de 1.75 litros por maceta de manera diaria.

Nutrición del cultivo; Se llevó a cabo mediante la solución Steiner (Steiner, 1961) iniciando con un 25 % de concentración (inicio de crecimiento), 50 % (crecimiento vegetativo pleno), 75 % (cuajado de frutos) y 100 % (llenado de fruto a cosecha).

Manejo fitosanitario; Para el control de plagas y enfermedades se realizó un plan de prevención para evitar que alguna plaga o enfermedad ataca al cultivo, se aplicó extracto de ajo una vez por semana y un insecticida de nombre comercial Nuprid cada 8 días en un horario de 7 a 9 am.

3.4. Determinación de las variables morfológicas

El crecimiento vegetativo se realizó mediante la medición de la longitud del tallo principal como indicador del desarrollo de las plantas en (cm), una semana después del trasplante se inició el monitoreo utilizando un flexómetro, con la finalidad de conocer el desarrollo de las plantas y el comportamiento que estas tenían respecto a los tratamientos, la toma de datos para esta variable fue por intervalos de 15 días. Otro de los parámetros cuantitativos fue el diámetro del tallo en (mm) medido con un vernier digital de alta precisión, la medición se efectuó a una altura estandarizada de tres centímetros por encima del nivel del sustrato, lo que permitió obtener datos consistentes y comparables entre las unidades experimentales.

3.5. Variables de calidad

Los diámetros del fruto (ecuatorial y polar) se midieron al momento de la cosecha con ayuda de un vernier digital marca steren, los datos obtenidos se registraron en cm.

La variable número de frutos por planta se cuantificó mediante el conteo directo de frutos (pieza) durante el ciclo productivo.

El peso del fruto (g), se evaluó al momento de la cosecha a los 83 días después del trasplante, los frutos se pesaron en una balanza digital registrando el peso individual de cada fruto en gramos, con el fin de establecer comparaciones entre tratamientos.

El rendimiento del cultivo (ton/ha) se estimó en base a una densidad de plantación de 22,000 plantas por ha.

El contenido de sólidos solubles totales (°Brix) se determinó con un refractómetro digital, colocando una gota de jugo de la pulpa de melón en el sensor para obtener la lectura.

Firmeza del fruto se determinó con un penetrómetro manual, utilizando una puntilla de ocho pulgadas para medir la cantidad de la fuerza en kg/cm² necesarios para penetrar el fruto.

El contenido de yodo se determinó con la técnica de cenizas alcalinas de Fisher *et al.* (1986), se pesaron 500 mg del tejido liofilizado previamente molido. La muestra se colocó en un crisol y posteriormente se agregaron 2 mL de KOH 2 M y 1 mL de KNO₃ 2 M. En seguida, la muestra en el crisol se llevó a predigestión en estufa a 100 °C por 2 h en una campana con extractor. Posteriormente, se colocaron las muestras a temperatura de 580 °C en una mufla por 3 h hasta la conclusión de la digestión de la muestra. Para luego colocar las cenizas en tubos cónicos para ser extraídas con 2 mL de KOH 2 M. La muestra fue centrifugada a 14 112 g por 15 minutos, una vez que se sedimentaron los sólidos, se tomó 1 mL del sobrenadante y se colocó en un matraz de aforación de 10 ml, aforando con la solución de KOH 2 M para su posterior análisis en un equipo de espectroscopía de emisión atómica de inducción por plasma (ICP-OES Agilent 725).

3.6. Diseño experimental utilizado

El establecimiento del experimento fue en un diseño completamente al azar, el cual consistió en 9 tratamientos con 10 repeticiones los cuales se describen a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Tratamientos aplicados en el experimento del cultivo melón en invernadero.

Tratamiento	Descripción
T1	Testigo absoluto
T2	KI, 5 ppm
T3	KIO ₃ , 10 ppm
T4	NPsCS, 250 ppm
T5	NPsCS, 500 ppm
T6	NPsCS-KIO ₃ , 250 ppm

T7	NPSCS-KIO ₃ , 500 ppm
T8	NPSCS-KI, 250 ppm
T9	NPSCS-KI, 500 ppm

Descripción de los tratamientos: KI.-yoduro de potasio, KIO₃.-yodato de potasio, NPSCS.- Nanoparticulas de quitosán, NPSCS-KIO₃.- Nanoparticulas de quitosán-yodato y NPSCS-KI.- Nanoparticulas de quitosán-yoduro.

Los tratamientos consistieron en evaluar las NPSCs-I con dos fuentes distintas de yodo (yoduro de potasio y yodato de potasio) en diferentes concentraciones, se evaluaron también las dos fuentes yodo (sales de KI y KIO₃).

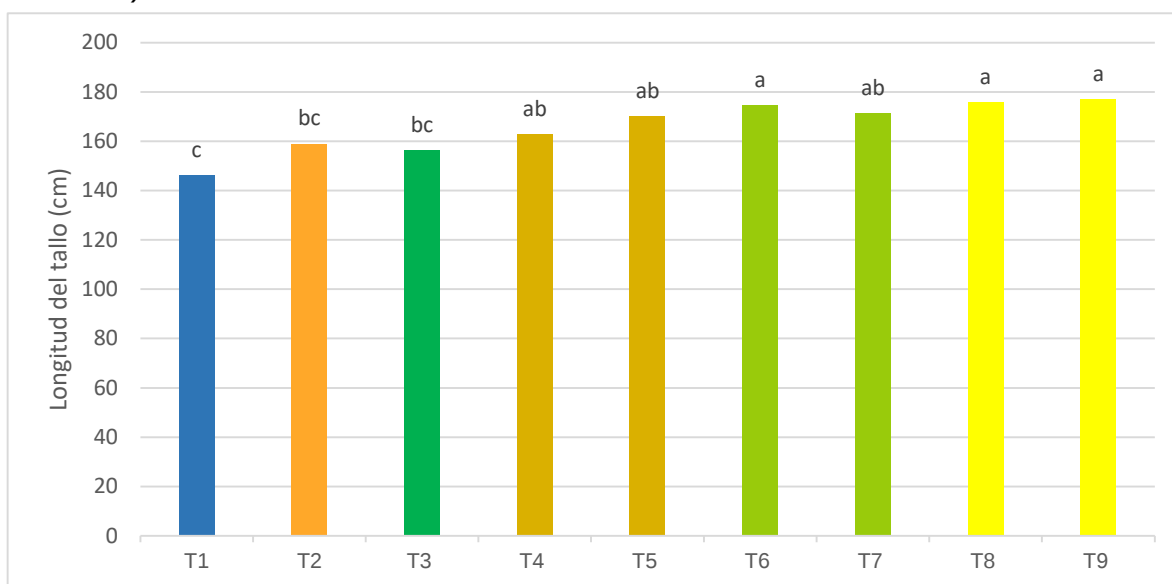
3.7. Análisis estadístico de datos

Para el análisis de los datos obtenidos del experimento se realizó en el software estadístico INFOSTAT en la versión 2020. En donde se realizó el Análisis de Varianza y la prueba de medias LSD Fisher ($p>0.05$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Longitud del tallo

En la figura 1 se observa una tendencia creciente en la longitud del tallo; los tratamientos con nanopartículas de quitosán con yoduro de potasio (NPSCS-KI) a una concentración de 250 ppm y 500 ppm (T8 y T9) presentaron un incremento del 20% respecto al testigo (T1), y las aplicaciones con sales yodadas (T2 Y T3), estudios previos han reportado que el quitosán mejora la división celular y elongación del tallo al modular la síntesis de fitohormonas como las auxinas en la estimulación del crecimiento apical, (Yu *et al.* 2021; Carmona *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2020).



Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO₃, 10 ppm; T4: NPSCS, 250 ppm; T5: NPSCS, 500 ppm; T6: NPSCS-KIO₃, 250 ppm; T7: NPSCS-KIO₃, 500 ppm; T8: NPSCS-KI, 250 ppm; T9: NPSCS-KI, 500 ppm.

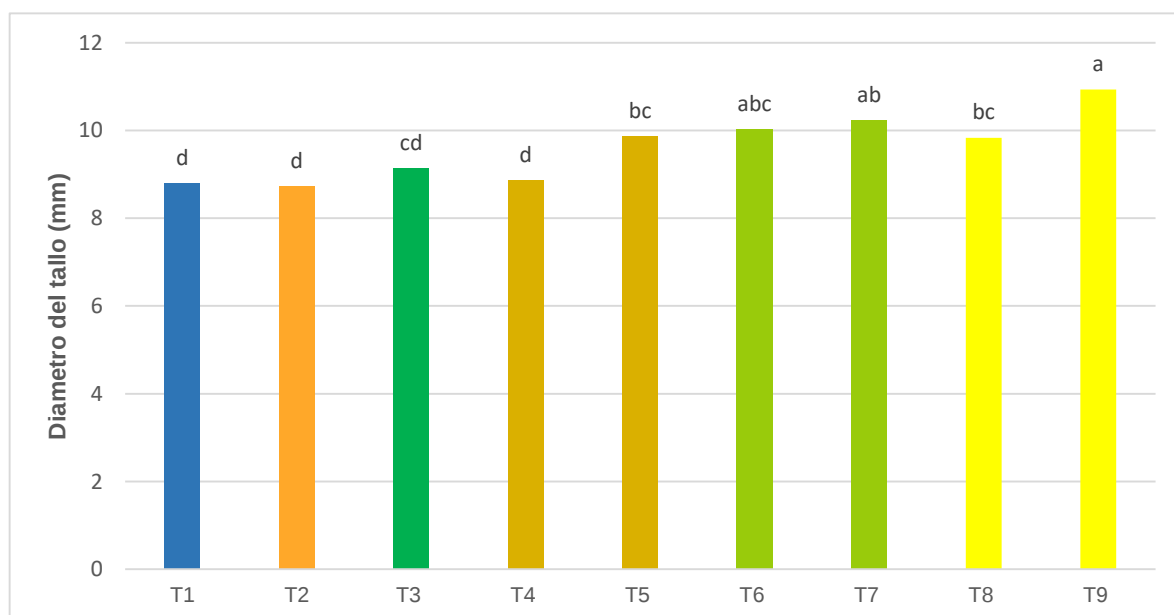
Figura 1. Efecto de la aplicación de las NPSCS-I sobre la longitud del tallo principal de plantas de melón.

4.2. Diámetro del tallo

En cuanto a la variable diámetro del tallo (Figura 2), los tratamientos con la aplicación de NPSCS-KI a 500 ppm (T9), mostraron un incremento significativo alcanzando un valor promedio de 19.93 mm, lo que representa un aumento del 19% en comparación al testigo (T1). Esta respuesta sugiere una influencia de las

nanopartículas de quitosán con yoduro de potasio actúa no solo como biofortificante si no también como promotor de vigor en la acumulación de biomasa en el tallo mientras los tratamientos T6 y T7, con nanopartículas de quitosán con yodato de potasio (NPSCS-KIO₃) a 500 ppm y 250 ppm, también mostraron incremento significativos con un valor promedio de 10.23 mm y 10.03 mm, respectivamente lo que indica que las NPSCS-KIO₃ poseen efectos favorables aunque ligeramente menor a las NPSCS-KI, lo cual coincide con los hallazgos de Rivera-Solís *et al.* (2024), quienes describieron que las nanopartículas de quitosán-yodo no solo mejoran la absorción de compuestos activos sino que también estimulan respuestas fisiológicas asociadas al crecimiento vegetativo.

En cuanto al testigo (T1) y los tratamientos con sales yodadas de KI y KIO₃ (T2 y T3) mostraron diámetros menores, por lo que las NPSCS mejoran la eficiencia de absorción y utilización del yodo, este resultado coincide con investigaciones que señalan que la nanoencapsulación previene pérdidas por lixiviación y volatilización, maximizando la disponibilidad del nutriente para la planta (Sadak *et al.*, 2022; Khajavian *et al.*, 2022; Morales-Maldonado *et al.*, 2022).

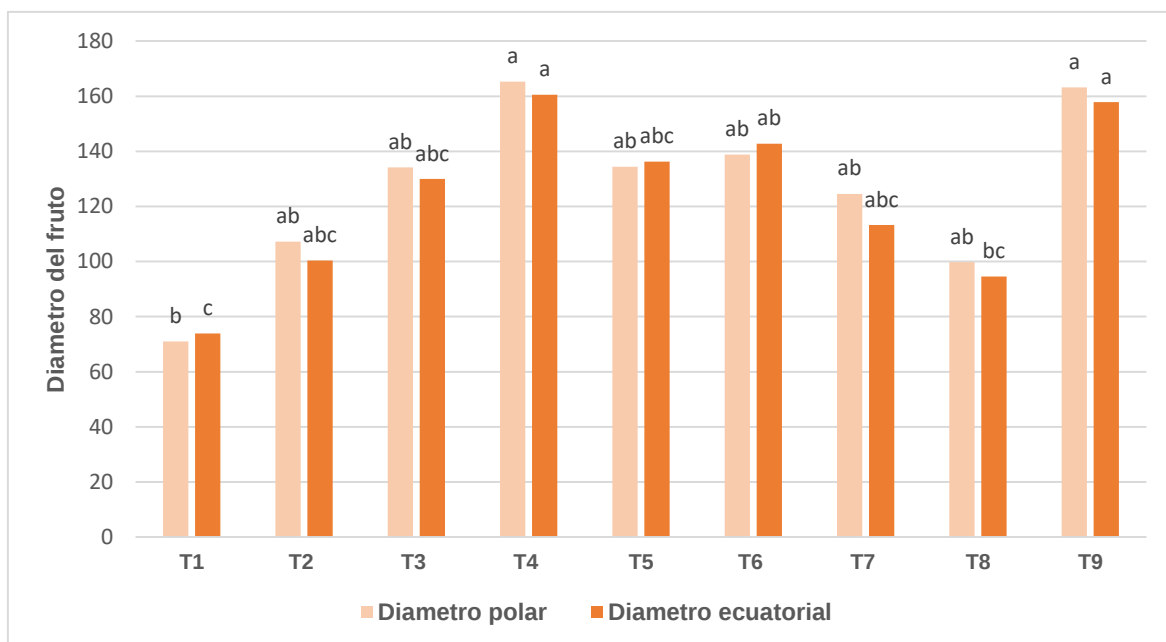


Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO₃, 10 ppm; T4: NPSCS, 250 ppm; T5: NPSCS, 500 ppm; T6: NPSCS-KIO₃, 250 ppm; T7: NPSCS-KIO₃, 500 ppm; T8: NPSCS-KI, 250 ppm; T9: NPSCS-KI, 500 ppm.

Figura 3. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el diámetro del tallo de plantas de melón.

4.3. Variables de Calidad: Diámetro del Fruto

De acuerdo a los resultados se puede observar mejoras tanto en el diámetro polar y ecuatorial (Figura 3), los tratamientos con nanopartículas de quitosán (NPsCS) a 250 ppm (T4) alcanzó una media de 165.25 mm en el diámetro polar, lo cual representa un incremento del 132% respecto al testigo, así mismo también se registró la media más alta en el diámetro ecuatorial con 160.5 mm, equivalente a un aumento del 117% en comparación con el testigo. Por su parte, el tratamiento (T9) de nanopartículas de quitosán con yoduro de potasio (NPsCS-KI) a 500 ppm tuvieron un efecto positivo en el tamaño del fruto de melón en relación al testigo, con una media de 163.25 mm en el diámetro polar y 157.9 mm en el diámetro ecuatorial, presentando un incremento en el diámetro polar de 129% y 113% respectivamente. El resto de los tratamientos mostraron un efecto positivo con el uso de nanopartículas sobre el tamaño del fruto. El uso de nanopartículas de quitosán (NPs-CS) se ha vuelto una alternativa prometedora en la agricultura abriendo la posibilidad de ser utilizadas como inductores de la calidad (Rivera *et al.*, 2024). Además, de acuerdo Ortega-Ortiz *et al.*, 2024 señalaron que los complejos de quitosán yodado tienen la capacidad de modular la calidad poscosecha mediante mecanismos de acción que involucran la regulación del metabolismo antioxidante y la mejora de la integridad celular, factores que podrían explicar en parte el incremento observado en el tamaño de los frutos tratados con los complejos NPsCS-I ya que representan una alternativa para la formulación de bioestimulantes que mejoren la calidad de los productos.



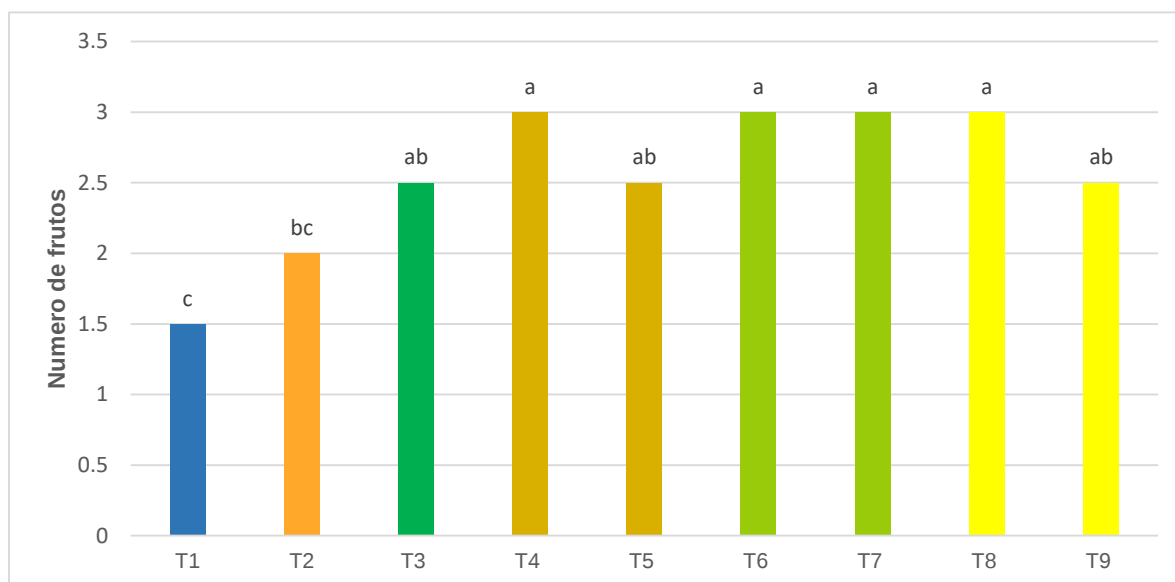
Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO₃, 10 ppm; T4: NPsCS, 250 ppm; T5: NPsCS, 500 ppm; T6: NPsCS-KIO₃, 250 ppm; T7: NPsCS-KIO₃, 500 ppm; T8: NPsCS-KI, 250 ppm; T9: NPsCS-KI, 500 ppm.

Figura 4. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el tamaño del fruto de melón.

4.4. Número de frutos por planta

En cuanto al número de frutos por planta (Figura 4), los tratamientos con aplicación foliar con nanopartículas de quitosán (NPsCS) a 250 ppm (T4), presentaron un promedio de tres frutos por planta, lo que representa un 100% respecto al testigo (T1) el cual apenas alcanzó los 1.5 frutos, asimismo también se observó en los tratamientos con NPsCS-KIO₃ (T6 y T7) y las NPsCS-KI (T8) alcanzando una media de tres frutos, los tratamientos T3, T5 y T9 registraron una media de 2.5 frutos por planta, con un aumento del 66% en comparación al testigo, estos resultados evidencian que la combinación de NPsCS con compuestos yodados, tales como yoduro (KI) y yodato (KIO₃), promueven un rendimiento frutal influyendo de manera positiva en la producción del melón (Ortega-Ortiz *et al.*, 2023; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2023; el cual apenas alcanzó los 1.5 frutos, así mismo también se observó en los tratamientos con nanopartículas de quitosán con yodato de potasio (NPsCS-KIO₃) (T6 y T7) y nanopartículas de quitosán con yoduro de potasio NPsCS-KI (T8)

alcanzando una media de tres frutos, los tratamientos T3, T5 y T9 registraron una media de 2.5 frutos por planta, con un aumento del 66% en comparación al testigo, estos resultados evidencia que la combinación de NPsCS con compuestos yodados, tales como yoduro (KI) y yodato (KIO_3), promueven un rendimiento frutal influyendo de manera positiva en la producción del melón (Ortega-Ortiz *et al.*, 2023; Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2023; Pichyangkura & Chadchawan, 2015).



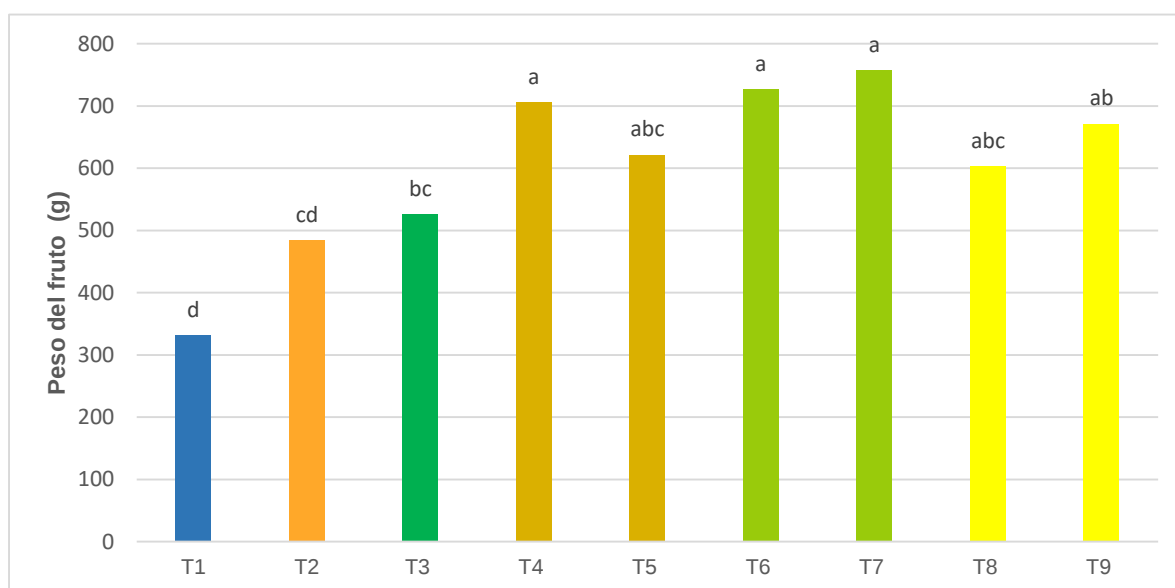
Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO_3 , 10 ppm; T4: NPsCS, 250 ppm; T5: NPsCS, 500 ppm; T6: NPsCS- KIO_3 , 250 ppm; T7: NPsCS- KIO_3 , 500 ppm; T8: NPsCS-KI, 250 ppm; T9: NPsCS-KI, 500 ppm

Figura 5. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el número de frutos por planta de melón.

4.5. Peso del Fruto

La aplicación foliar de nanopartículas de quitosán con yodato de potasio NPsCS- KIO_3 (T7) a 500 ppm (Figura 5), tuvo el peso promedio del fruto de melón con una media de 757.4 gramos por fruto, lo que equivale a un mayor incremento del 128% en relación al testigo con una media de 332.15 g, de igual forma los tratamientos T6 (NPsCS- KIO_3 , 250 ppm) y T4 (NPsCS, 250 ppm) superaron los 700 g, alcanzando incrementos del 118% y 112% respectivamente. El tratamiento T9 (NPsCS-KI a 500 ppm), representa un aumento del 102% frente al testigo, en cuanto a los tratamientos con sales yodadas T2 (KI, 5 mg) y T3 (KIO_3 , 10 mg), se obtuvo un

incremento del 58% y el 46% respectivamente en relación con el testigo, esto podría explicarse con la mejora en la absorción foliar, la liberación del elemento activo y una mayor interacción fisiológica de la planta. De acuerdo a lo reportado por Rivera-Solís *et al.* (2024), que las nanopartículas de quitosán con yodo inducen un efecto positivo en el crecimiento y vigor de las plantas hortícolas mediante la activación de las rutas metabólicas de transporte y asimilación de nutrientes. Así mismo Ortega-Ortiz *et al.* (2023) destacan que los complejos yodados actúan no solo como agentes antimicrobianos poscosecha, sino también como promotores al influir en el rendimiento y sobre el desarrollo del fruto durante su fase de llenado.



Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO₃, 10 ppm; T4: NPsCS, 250 ppm; T5: NPsCS, 500 ppm; T6: NPsCS-KIO₃, 250 ppm; T7: NPsCS-KIO₃, 500 ppm; T8: NPsCS-KI, 250 ppm; T9: NPsCS-KI, 500 ppm.

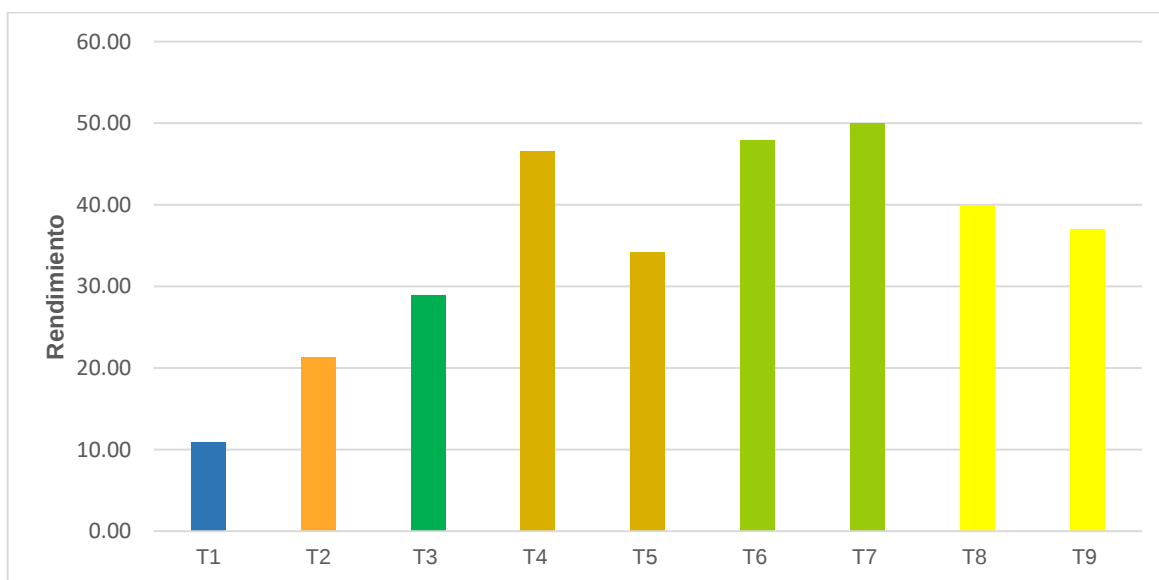
Figura 6. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el peso promedio del fruto de melón.

4.6. Rendimiento

El rendimiento del cultivo del melón aumento significativamente el tratamiento T7 de NPsCS-KIO₃, a 500 ppm que alcanzo 49.99 Ton/Ha, lo que equivale a un incremento del 356% respecto al testigo, resultados similares se observaron con el

tratamiento T6 de NPsCS-KIO₃, 250 ppm con un aumento del 337% y T4 NPsCS, 250 ppm con 324% al valor del testigo.

En cuanto a los tratamientos con yoduro de potasio, T8 (NPsCS-KI, 250 ppm) y T9 (NPsCS-KI, 500 ppm) incrementaron el rendimiento en 263% y 237% respectivamente. En comparación con el T5 (NPsCS, 500 ppm) que generaron un aumento del 212%, mientras los tratamientos con sales de yodo, T2 (KI, 5 ppm) y T3 (KIO₃, 10 ppm) mejoraron en un 94% y 164%, respectivamente, aunque con menor eficacia en comparación con los nanocompuestos.



Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO₃, 10 ppm; T4: NPsCS, 250 ppm; T5: NPsCS, 500 ppm; T6: NPsCS-KIO₃, 250 ppm; T7: NPsCS-KIO₃, 500 ppm; T8: NPsCS-KI, 250 ppm; T9: NPsCS-KI, 500 ppm.

Figura 7. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el rendimiento por planta de melón.

El uso de las nanopartículas de quitosán, tanto solas como suplementadas con yodo, favorecen los procesos fisiológicos que impactan directamente en la productividad. Ramírez-Rodríguez *et al.* (2024) reportaron que las nanopartículas de quitosán (NPsCS) estimulan la acumulación de biomasa y fortalecen el metabolismo vegetal, mientras que Treviño-Ruiz *et al.* (2024) reportaron que las NPsCS yodadas biofortifican y aumentan el rendimiento en lechuga. Esto afirma su aplicación en cultivos hortícolas como una herramienta agronómica efectiva.

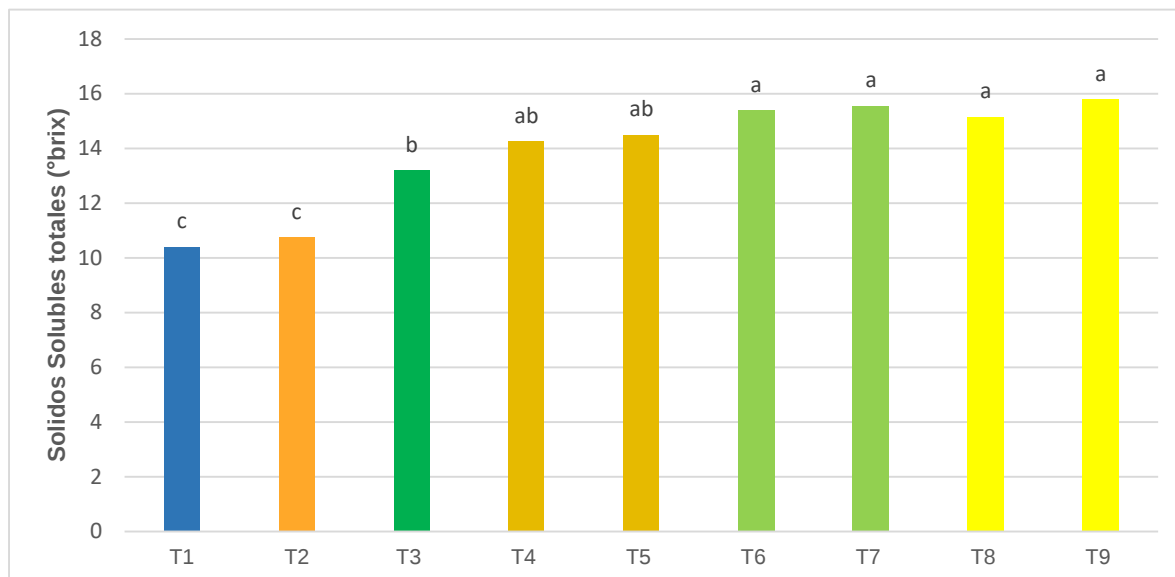
Considerando que el rendimiento del melón depende de la interacción entre factores genéticos, ambientales y de manejo (Arreola Ventura, 2016), la integración de los bioinsumos como las nanopartículas de quitosán pueden optimizar dicha interacción. Flores Ramírez (2023) señaló que el número de frutos por planta influye directamente en el rendimiento total, lo que refuerza el valor del presente hallazgo como una estrategia para incrementar la productividad total sin afectar la calidad del fruto. Los hallazgos de este estudio demuestran la eficacia de las nanopartículas de quitosán-yodo en la mejora del rendimiento del melón, lo que respalda como una tecnología clave en la biofortificación y sostenibilidad agrícola.

4.7. Contenido de sólidos solubles totales (°Brix)

La aplicación foliar de nanopartículas de quitosán con yodato de potasio NPsCS-KIO₃ y yoduro de potasio NPsCS-KI tuvieron un incremento significativo en los niveles de °Brix en frutos de melón (*Cucumis melo* L.) superando al testigo. El tratamiento T9 con NPsCS-KI a 500 ppm, presentó el mayor contenido de sólidos solubles con un valor de 15.8 °Brix, lo cual representa un incremento del 51.9 % respecto al testigo (10.4 °Brix). Esta mejora en la calidad interna del fruto puede atribuirse a la capacidad de las nanopartículas de quitosán para facilitar la absorción foliar de elementos, y a la función del yodo como bioestimulante en el metabolismo secundario, conforme lo han señalado Leija-Martínez et al. (2016) y Lara-Izaguirre et al. (2023).

El tratamiento T7 (NPsCS-KIO₃ a 500 ppm) mostró un aumento del 49.5% en comparación con el testigo, mientras que el T6 (NPsCS-KIO₃ a 250 ppm) reflejó un incremento del 48.1%, estas respuestas nos sugieren que el quitosán con yodato de potasio a menores concentraciones es eficaz para mejorar el contenido de azúcares en frutos, de acuerdo a lo documentado por Díaz Gómez et al., s.f. quienes reportaron beneficios fisiológicos asociados al uso de yodo en forma de sal potásica. En cuanto a los tratamientos con nanopartículas de quitosán (NPsCS) sin suplementación con yodo (T4 y T5) también mostraron un efecto positivo al alcanzar incrementos respectivamente del 37% y 39.4%, lo que demuestra el efecto de las

nanopartículas de quitosán como agente bioestimulante, posiblemente debido a su capacidad de inducir la síntesis de compuestos osmóticamente activos y antioxidantes, tal como lo han discutido Constantino Díaz *et al.* (2015).



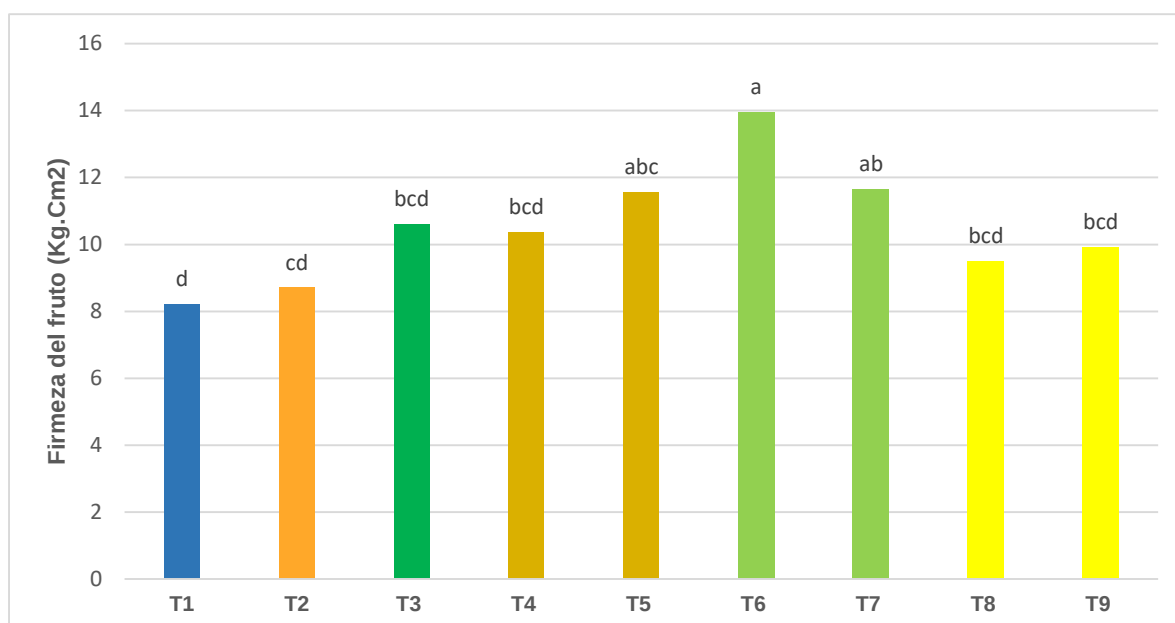
Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO₃, 10 ppm; T4: NPSCS, 250 ppm; T5: NPSCS, 500 ppm; T6: NPSCS-KIO₃, 250 ppm; T7: NPSCS-KIO₃, 500 ppm; T8: NPSCS-KI, 250 ppm; T9: NPSCS-KI, 500 ppm.

Figura 8. Efecto de la aplicación de las NPSCS-I sobre el contenido de sólidos solubles totales en el fruto de melón.

4.8. Firmeza del Fruto

En cuanto a la firmeza del fruto, el tratamiento T6 (NPSCS-KIO₃ a 250 ppm) representa un incremento del 70.1 % con respecto al testigo. Este efecto sugiere una posible relación entre la biofortificación con yodo y el fortalecimiento de las estructuras celulares, favoreciendo la integridad del parénquima del fruto, aspecto también observado en melones biofortificados con yodo potásico en condiciones controladas (Gordillo Melgoza *et al.*, 2016). El tratamiento T7 (NPSCS-KIO₃ a 500 ppm) con un incremento del 42% mientras que el T5 (NPSCS a 500 ppm) representa una mejora del 40.8 %. Estos resultados confirman que la presencia de las sales yodadas (KI y KIO₃) tiene una influencia directa sobre parámetros de calidad postcosecha, aunque los tratamientos T8 y T9 con NPSCS-KI a diferentes concentraciones no obtuvieron valores significativos de firmeza respecto al testigo.

y siguen siendo relevantes en términos agronómicos y comerciales. La estrategia de la biofortificación con yodo en su forma de yodato de potasio resulto significativamente mejorando el contenido de sólidos solubles y la firmeza del fruto, esto refuerza lo planteado por Lara-Izaguirre *et al.* (2023), quienes destacan que la aplicación exógena de yodo, en combinación con compuestos bioactivos, permite no solo elevar el contenido nutracéutico del fruto sino también extender su vida de anaquel sin comprometer su calidad comercial.



Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO₃, 10 ppm; T4: NPsCS, 250 ppm; T5: NPsCS, 500 ppm; T6: NPsCS-KIO₃, 250 ppm; T7: NPsCS-KIO₃, 500 ppm; T8: NPsCS-KI, 250 ppm; T9: NPsCS-KI, 500 ppm.

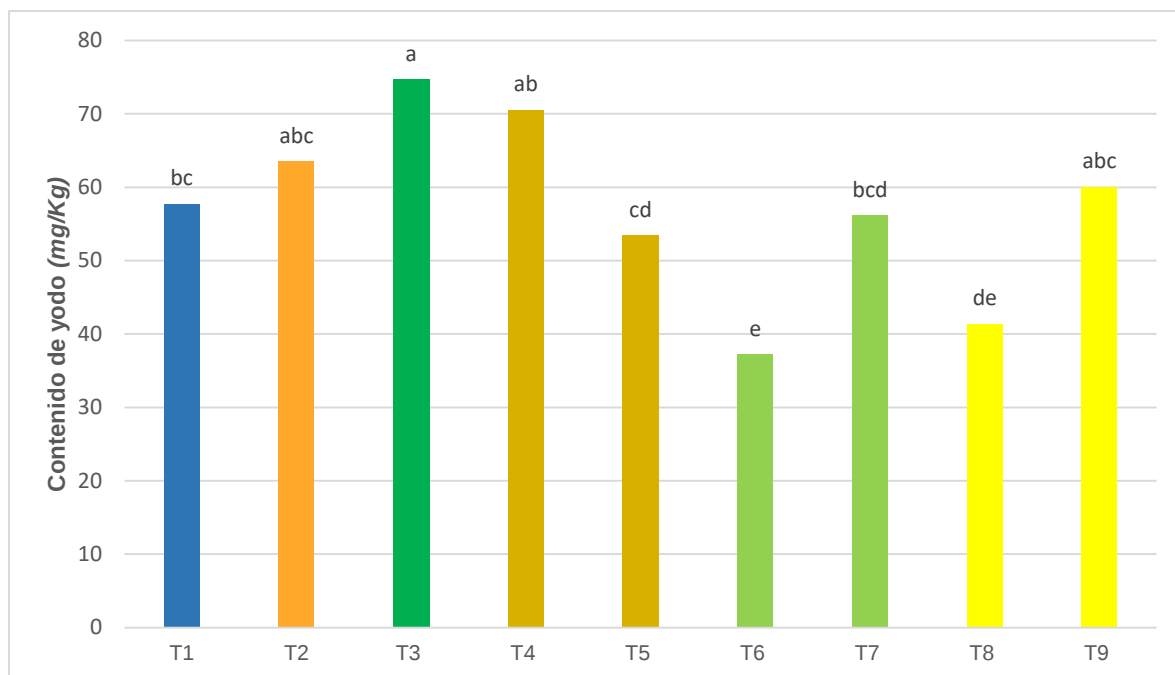
Figura 9. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre la firmeza del fruto de melón.

4.9. Contenido de yodo

La cuantificación del contenido de yodo en frutos de melón (Figura 9) mostró variabilidad entre los tratamientos aplicados, el tratamiento T3 (KIO₃, 10 ppm), presentó el valor más elevado, lo que representa un incremento del 29.4% respecto al testigo. Esta respuesta fue seguida por T4 (NPsCS, 250 ppm) con un aumento del 22.1%; ambos tratamientos mostraron aumento respecto al testigo, indicando una eficiencia en la acumulación del micronutriente.

El tratamiento T2 (KI, 5 ppm) mostró un incremento del 10%, T9 (NPsCS-KI, 500 ppm), con un aumento del 4%, estos tratamientos mostraron comportamientos

similares, con diferencias estadísticas respecto a los tratamientos de mayor eficiencia.



Descripción de los tratamientos aplicados en el experimento. T1: Testigo; T2: KI, 5 ppm; T3: KIO₃, 10 ppm; T4: NPsCS, 250 ppm; T5: NPsCS, 500 ppm; T6: NPsCS-KIO₃, 250 ppm; T7: NPsCS-KIO₃, 500 ppm; T8: NPsCS-KI, 250 ppm; T9: NPsCS-KI, 500 ppm.

Figura 9. Efecto de la aplicación de las NPsCS-I sobre el contenido de yodo en el fruto de melón.

Por otra parte, con el tratamiento T5 (NPsCS, 500 ppm) hay una reducción del 7.5 % frente al testigo. Por otra parte, T7 NPsCSKIO₃, 500 ppm, con un descenso del 2.8 %. Los tratamientos T8 (NPsCS-KI, 250 ppm) y T6 (NPsCSKIO₃, 250 ppm), mostraron los valores más bajos lo que equivale a reducciones del 28.3 % y 35.6 % respectivamente.

Los resultados negativos en los tratamientos T5, T6 y T8 podrían atribuirse a una posible inhibición en la absorción del yodo debido a una saturación del sistema o a una limitada movilidad de las formas iónicas utilizadas. Golubkina *et al.* (2021) argumentaron que la forma química del yodo influye directamente en su transporte y acumulación, lo que concuerda con el comportamiento observado en el presente experimento.

Lo observado en los tratamientos T3 y T4 coincide con lo reportado por Sangerman-Jarquín *et al.* (2023), quienes reportan que los complejos yodados de quitosán incrementan la acumulación de yodo en chile jalapeño. De forma complementaria, García-Fuentes *et al.* (2022) identificaron que el yodo molecular posee una alta biodisponibilidad cuando se aplica vía foliar, superando al yodato en ambientes con estrés salino. Dávila-Rangel *et al.* (2020) también documentaron un patrón similar en lechuga, destacando al quitosán como eficaz en la biofortificación con yodo.

El tratamiento T4, comparable al de T3, sugiere que las nanopartículas de quitosán poseen la capacidad de facilitar la captación de yodo disponible en el entorno. Esta hipótesis está respaldada por Mageshen y Santhy (2022, 2023), quienes confirmaron que el quitosán nanoestructurado no solo actúa como transportador, sino que estimula procesos fisiológicos que favorecen la acumulación de nutrientes esenciales en tomate. En cultivos como berenjena, Lara-Izaguirre *et al.* (2023) también identificaron un efecto modulador del quitosán sobre la acumulación de yodo, influenciado por la formulación empleada y el tipo de tejido vegetal.

Los resultados obtenidos en este experimento reafirman el potencial del quitosán como acomplexante de microelementos como el yodo, en estrategias de biofortificación, siendo capaz de igualar e incluso superar el efecto de las sales de yodo aplicadas (KI o KIO₃) cuando se aplica en condiciones óptimas de concentración y formulación.

V. CONCLUSIONES

- La aplicación foliar de las nanopartículas de quitosán-yodo (NPsCS-KI y NPsCS-KIO₃) presentaron mejoras significativas en el desarrollo vegetativo, el rendimiento y la calidad comercial del cultivo de melón.
- Las nanopartículas de quitosán-yodo (NPsCS-KI y NPsCS-KIO₃) evaluadas demostraron eficiencia en variables agronómicas, superando al testigo y a los tratamientos con sales de yodo como KI y KIO₃.
- Las nanopartículas de quitosán-yodato (NPsCS-KIO₃) a 500 ppm, mostraron los mejores efectos en el cultivo de melón presentando mayor peso de fruto, rendimiento por planta mayor, alto contenido de sólidos solubles y firmeza del fruto, aunque en el contenido de yodo no mostro diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos.
- En cuanto al contenido de yodo en el fruto no presentó un incremento estadísticamente significativo, lo que limita la validación del efecto biofortificante. Aun así, el uso de las NPsCS-I representan una alternativa viable para optimizar la productividad hortícola bajo criterios de sostenibilidad y eficiencia nutrimental.

VI. LITERATURA CITADA

- Aparo, N. O., Olum, S., Atimango, A. O., Odongo, W., Aloka, B., Ongeng, D., ... & De Steur, H. (2023).** Farmers' intention to adopt agronomic biofortification: The case of iodine biofortified vegetables in Uganda. *Horticulturae*, 9(3), 401. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030401>
- Bauer, J. L., Villegas, L. F., & Zucchetti, A. (2022).** Aplicaciones del quitosano en la agricultura, la industria y la salud: Applications of chitosan in agriculture, industry and health. *South Florida Journal of Environmental and Animal Science*, 2(2), 37-45. <https://doi.org/10.53499/sfjeasv2n2-001>
- Blanco Metzler, A., Madriz Morales, K., & Ramos, E. (2020).** El desafío de reducir el consumo de sal/sodio en la dieta de la población latinoamericana.
- Buturi, C. V., Mauro, R. P., Fogliano, V., Leonardi, C., & Giuffrida, F. (2021).** Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *Foods*, 10(2), 223. <https://doi.org/10.3390/foods10020223>
- Cabral-Pinto, M. M., Inácio, M., Neves, O., Almeida, A. A., Pinto, E., Oliveiros, B., & Ferreira da Silva, E. A. (2020).** Human health risk assessment due to agricultural activities and crop consumption in the surroundings of an industrial area. *Exposure and Health*, 12, 629-640. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00323-x>
- Carmona, E. R., Rojo, C., & Vergara Carmona, V. (2024).** Nanomaterial-Based Biofortification: Potential Benefits and Impacts of Crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(43), 23645-23670. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c05079>
- Caro-León, F. J., López-Martínez, L. M., Lizardi-Mendoza, J., Argüelles-Monal, W., Goycoolea-Valencia, F. M., Carvajal-Millán, E., & López-Franco, Y. L. (2019).** Preparation methods of chitosan nanoparticles: A review. *BIOtecnica*, 21(3), 13-25. <https://doi.org/10.18633/biotecnica.v21i3.1007>
- Chinnici, G., Zarbà, C., Privitera, D., Matarazzo, A., & Scuderi, A. (2023).** FOOD ATTRIBUTES OF FORTIFIED FOODS: AN ANALYSIS OF CONSUMPTION

BEHAVIOR. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 23(6.2), 223-230. <https://doi.org/10.5593/sgem2023V/6.2/s25.28>

Constantino Díaz, A. E., Borrego Escalante, F., Benavides Mendoza, A., & Gordillo Melgoza, F. A. (2015). Efecto del yoduro de potasio en la morfología y fisiología del melón (*Cucumis melo* L.) en invernadero.

Da Silva, F. H. A., de Moraes, P. L. D., da Silva Dias, N., de Sousa Nunes, G. H., de Moraes, M. B., Melo, M. F., & de Albuquerque Nascimento, M. T. (2021). Physiological aspects of melon (*Cucumis melo* L.) as a function of salinity. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 1298-1314. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10190-5>

Dávila Rangel, I. E., Trejo Téllez, L. I., Ortega Ortiz, H., Juárez Maldonado, A., González Morales, S., Companioni González, B., ... & Benavides Mendoza, A. (2020). Comparison of iodide, iodate, and iodine-chitosan complexes for the biofortification of lettuce. *Applied Sciences*, 10(7), 2378. <https://doi.org/10.3390/app10072378>

Díaz Gómez, A. A., Borrego Escalante, F., Benavides Mendoza, A., & Robledo Torres, V. Biofortificación con yoduro de potasio en el cultivo de melón (*Cucumis Melo* L.) y su implicación en la morfología y fisiología de la planta.

El-Ramady, H., Shedeed, S., Abdalla, Z. F., El-Bassiony, A. E. M., El-Sawy, S., Mahmoud, S., & Prokisch, J. (2023). Biofortification of vegetables under stress conditions using biological nano-selenium: A mini-review. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 7(2023), 23-35. <https://doi.org/10.21608/jenvbs.2023.192780.1210>

Espinoza-Arellano, J. D. J., Fabela-Hernández, A. M., Gaytán-Mascorro, A., Reyes-González, A., & Sánchez-Toledano, B. I. (2023). Cuantificación y uso de pérdidas de alimentos: caso del melón cantaloupe en una región del norte-centro de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(2), 159-170. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i2.2962>

FAOSTAT, C. (2023). *Livestock Products, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Statistics Division (FAOSTAT)*.

- Fischer**, P. W., L'Abbé, M. R., & Giroux, A. (1986). Colorimetric determination of total iodine in foods by iodide-catalyzed reduction of Ce⁺ 4. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 69(4), 687-689. <https://doi.org/10.1093/jaoac/69.4.687>
- Flores Ramírez**, H. D. (2023). *Evaluación del número de frutos y rendimiento en tres híbridos de melón (Cucumis melo L.), cultivado en invernadero* (Bachelor's thesis, Jipijapa-Unesum). Obtenido de. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/5757>
- Fuentes**, J. E. G., Castellanos, B. F. H., Martínez, E. N. R., Ortiz, W. A. N., Mendoza, A. B., & Macías, J. M. (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>
- Golubkina**, N., Moldovan, A., Kekina, H., Kharchenko, V., Sekara, A., Vasileva, V., ... & Caruso, G. (2021). Joint biofortification of plants with selenium and iodine: new field of discoveries. *Plants*, 10(7), 1352. <https://doi.org/10.3390/plants10071352>
- Gordillo Melgoza**, F. A., Borrego Escalante, F., Lozano Cavazos, C. J., Torres, V. R., Nieves Rodríguez-Mendoza, M. D. L., González Fuentes, J. A., & Benavides Mendoza, A. (2016). Melon plant response to applications potassium iodine.
- Govindaraj**, M. (2015). Is fortification or bio fortification of staple food crops will offer a simple solution to complex nutritional disorder in developing countries?. *Journal Nutrition Food Science*, 5(2), 1-4. <http://dx.doi.org/10.4172/2155-9600.1000351>
- Halka**, M., Smoleń, S., & Ledwożyw-Smoleń, I. (2020). Antioxidant potential and iodine accumulation in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings as the effect of the application of three different iodobenzoates. *Folia Horticulturae*, 32(2), 203-219. <https://doi.org/10.2478/fhort-2020-0019>
- Hatch-McChesney**, A., & Lieberman, H. R. (2022). Iodine and iodine deficiency: a comprehensive review of a re-emerging issue. *Nutrients*, 14(17), 3474. <https://doi.org/10.3390/nu14173474>

- Ingle**, P. U., Shende, S. S., Shingote, P. R., Mishra, S. S., Sarda, V., Wasule, D. L., ... & Gade, A. (2022). Chitosan nanoparticles (ChNPs): A versatile growth promoter in modern agricultural production. *Heliyon*, 8(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11893>
- Ketnawa**, S., Reginio Jr, F. C., Thuengtung, S., & Ogawa, Y. (2022). Changes in bioactive compounds and antioxidant activity of plant-based foods by gastrointestinal digestion: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 62(17), 4684-4705. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878100>
- Khan**, M., Khan, A. U., Hasan, M. A., Yadav, K. K., Pinto, M. M., Malik, N., ... & Sharma, G. K. (2021). Agro-nanotechnology as an emerging field: a novel sustainable approach for improving plant growth by reducing biotic stress. *Applied Sciences*, 11(5), 2282. <https://doi.org/10.3390/app11052282>
- Kiferle**, C., Martinelli, M., Salzano, A. M., Gonzali, S., Beltrami, S., Salvadori, P. 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>
- Krzepilko**, A., Prazak, R., Skwarylo-Bednarz, B., & Molas, J. (2019). Agronomic biofortification as a means of enriching plant foodstuffs with iodine. *Acta Agrobotanica*, 72(2). <https://doi.org/10.5586/aa.1766>
- Kyriacou**, M. C., & Roupahel, Y. (2018). Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae*, 234, 463-469. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.046>
- Lara-Izaguirre**, A. Y., Rojas-Velázquez, Á. N., Alcalá-Jáuregui, J. A., Alia-Tejacal, I., Méndez-Cortés, H., & Hernández-Montoya, A. (2023). Iodine biofortification and antioxidant activity in eggplant fruits (*Solanum melongena* L.). *Revista fitotecnia mexicana*, 46(4), 399-407. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4.399>
- Lecholocholo**, N., Shoko, T., Manhivi, V. E., Maboko, M. M., Akinola, S. A., & Sivakumar, D. (2022). Influence of different rootstocks on quality and volatile constituents of cantaloupe and honeydew melons (*Cucumis melo*. L) grown

- in high tunnels. *Food Chemistry*, 393, 133388.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133388>
- Lee, S. Y.** (2021). Consequences of iodine deficiency in pregnancy. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 740239. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.740239>
- Leija-Martínez, P., Benavides-Mendoza, A., Rocha-Estrada, A., & Medrano-Macías, J. R.** (2016). Iodine biofortification in plants for human consumption. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(8), 2025-2036.
- López-Maldonado, V.** (2023). Uso de la nanotecnología en los diferentes sistemas productivos. *Milenaria, Ciencia y arte*, (22), 19-22.
<https://doi.org/10.35830/mcya.vi22.410>
- Mageshen VR, Santhy P** (2023) Effect of chitosan iodate complex biofortification on nutrient uptake in 'shivam' hybrid of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Applied and Natural Science* 15: 549-554. DOI: 10.31018/jans.v15i2.4461. <https://doi.org/10.31018/jans.v14i3.3583>
- Mageshen, V. R., Santhy, P., Meena, S., Latha, M. R., Senthil, A., Saraswathi, T., & Janaki, P.** (2022). Influence of potassium iodate and chitosan iodate complex on growth, yield, quality and iodine uptake in 'shivam' hybrid of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Applied and Natural Science*, 14(3), 784-795.
- Maluin, F. N., & Hussein, M. Z.** (2020). Chitosan-based agronanochemicals as a sustainable alternative in crop protection. *Molecules*, 25(7), 1611.
<https://doi.org/10.3390/molecules25071611>
- Medrano-Macías, J., Leija-Martínez, P., Juárez-Maldonado, A., Rocha-Estrada, A., & Benavides-Mendoza, A.** (2016). Effect of iodine application on antioxidants in tomato seedlings. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 22(2), 133-143.
<http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.12.025>
- Mégier, C., Dumery, G., & Luton, D.** (2023). Iodine and thyroid maternal and fetal metabolism during pregnancy. *Metabolites*, 13(5), 633.
<https://doi.org/10.3390/metabo13050633>
- Messellem, I., Aguib, S., Abed, R., & Abderrezak, S.** (2024). Comparative Study of Pollination Efficiency and Yield Components of Melon Crops by Three Bee

- Species in Algeria. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 97(1), 1-12.
<https://doi.org/10.2317/0022-8567-97.1.1>
- Molina Arias**, M., Ochoa Sangrador, C., & Ortega Páez, E. (2020). Comparación de dos medias. Pruebas de la t de Student. *Evidencias en Pediatría*, 16, 51.
- Organización Mundial de la Salud (OMS)**. (2022). Deficiencias de micronutrientes: Datos epidemiológicos mundiales 2000-2022 [Informe técnico]. *Obtenido de*.
<https://www.who.int/nutrition/topics/micronutrients/en/>
- Ortega-Ortiz**, H., Soriano-Melgar, L. D. A. A., & Treviño-López, E. A. (2023). Postharvest quality of melon (*Cucumis melo* L.) by effect of iodinated chitosan complexes. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(spe3). <https://doi.org/10.19136/era.a10niii.3654>
- Ortega-Ramirez**, A. T., Silva-Marrufo, O., Perez-Rubio, Y. E., Alaniz-Villanueva, O. G., Herrera-Gamboa, J., Marin-Tinoco, R. I., ... & Sariñana-Aldaco, O. (2025). Biostimulant Effects of Iodine on the Biomass, Biomolecules, and Nutritional Profile of Lettuce Seedlings. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-10.
<https://doi.org/10.1007/s42729-025-02296-0>
- Osuji**, E. E., Anyiam, K. H., Nwose, R. N., Keyagha, E. R., Umeh, O. A., Ukoha, I. I., ... & Osuagwu, C. O. (2025). Incentivizing Biofortification-Defeating Malnutrition and Nutrient Deficiency, A Novel Approach to Food-Nutritional Security in Nigeria. *Food Science and Technology*, 13(1), 15-25.
- Pabbati**, R., Chepuri, K., Reddy, KV, y Maddela, NR (Eds.). (2025). *Síntesis de nanopartículas vegetales para la agricultura sostenible*. CRC Press.
- Paris**, H. S. (2015). Origin and emergence of the sweet dessert watermelon, *Citrullus lanatus*. *Annals of botany*, 116(2), 133-148.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcv077>
- Pechar**, G. S., Sánchez-Pina, M. A., Coronado-Parra, T., Bretó, P., García-Almodóvar, R. C., Liu, L., ... & Donaire, L. (2024). Developmental stages and episode-specific regulatory genes in andromonoecious melon flower development. *Annals of Botany*, 133(2), 305-320.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcad186>
- Peláez**, I. M. (2012). Comparación de medias. *Revista SEDEN*, 165-184.

- Pichyangkura, R., & Chadchawan, S. (2015).** Biostimulant activity of chitosan in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 49-65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.031>
- Priyashantha, H., Kurukulasuriya, M. S., Ranadheera, C. S., Jayarathna, S., & Vidanarachchi, J. K. (2025).** Biofortification as a sustainable solution to combat micronutrient malnutrition in the global south with a focus on Sri Lanka: potential, challenges, and policy implications. *Discover Food*, 5(1), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00381-y>
- Radouane, N., Ezrari, S., Belabess, Z., Tahiri, A., Tahzima, R., Massart, S., ... & Lahlali, R. (2021).** Viruses of cucurbit crops. *Phytopathologia Mediterranea*, 60(3), 493-520. <https://www.jstor.org/stable/27248701>
- Ramirez-Gottfried, V. B., Fortis-Hernandez, M., Gonzalez-Avalos, R., & Preciado-Rangel, P. (2023).** Iodine application in *Vitis vinifera* L. cv. 'Cabernet Sauvignon' improve bioactive compounds and enzymatic activity in berries. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(1), 13074-13074. <https://doi.org/10.15835/nbha51113074>
- Ramírez-Rodríguez, S. C., Ortega-Ortiz, H., González-Morales, S., & Preciado-Rangel, P. (2023).** Chitosan nanoparticles improve yield, enzymatic activity, and bioactive compounds in tomato fruits. *Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1686>
- Ramírez-Rodríguez, S., Preciado-Rangel, P., Cabrera-De, M., González-Morales, S., & Ortega-Ortiz, H. (2024).** Chitosan Nanoparticles as Biostimulant in Lettuce. *Phyton*, 93(4), 777. <http://dx.doi.org/10.32604/phyton.2024.048096>
- Riseh, R. S., Vatankhah, M., Hassanisaadi, M., & Varma, R. S. (2024).** A review of chitosan nanoparticles: Nature's gift for transforming agriculture through smart and effective delivery mechanisms. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260, 129522. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129522>
- Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. (2021).** Zinc oxide nanoparticles and their effect on melon yield and quality. *Revista mexicana*

de ciencias agrícolas, 12(5), 791-803.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2987>

Rivera-Solís, L. L., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., Flores-López, M. L., 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).

<https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3623>

Riyazuddin, R., Singh, K., Iqbal, N., Nisha, N., Rani, A., Kumar, M., ... & Gupta, R. (2023). 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-](https://doi.org/10.1007/s11104-022-05750-5)

[05750-5](https://doi.org/10.1007/s11104-022-05750-5)

Rural, S. D. (2023). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Producción nacional de melón. Gobierno de México. *Obtenido de*.

<https://www.gob.mx/sader>

Sabatino, L., Di Gaudio, F., Consentino, B. B., Roupael, Y., El-Nakhel, C., La Bella, S., ... & De Pasquale, C. (2021). Iodine biofortification counters micronutrient deficiency and improve functional quality of open field grown curly endive. *Horticulturae*, 7(3), 58. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030058>

Sangerman-Jarquín, D. M., Sariñana-Aldaco, O., Lara-Reimers, E. A., Ortega-Ortíz, H., Márquez-Guerrero, S. Y., & Preciado-Ramgel, P. (2023). Influence of biofortification with chitosan-iodine complexes on the phytochemical quality of jalapeño pepper fruits. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(3).

<https://doi.org/10.19136/era.a10n3.3891>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). Melón mexicano, un fruto con creciente demanda y producción nacional. Gobierno de México. *Obtenido de*.

[https://www.gob.mx/agricultura/prensa/melon-mexicano-un-fruto-con-](https://www.gob.mx/agricultura/prensa/melon-mexicano-un-fruto-con-creciente-demanda-y-produccion-nacional-agricultura)

[creciente-demanda-y-produccion-nacional-agricultura](https://www.gob.mx/agricultura/prensa/melon-mexicano-un-fruto-con-creciente-demanda-y-produccion-nacional-agricultura)

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Obtenido de*.

<https://www.gob.mx/siap>

- Seymen**, M., Yavuz, D., Türkmen, Ö., Kal, Ü., Yavuz, N., Kıymacı, G., ... & Kurtar, E. S. (2025). Evaluation of inbred melon genotypes for water stress tolerance based on yield, physiological and biochemical properties, and stress tolerance indices. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 1-28. <https://doi.org/10.1080/01140671.2025.2499241>
- Shang**, Y., Hasan, M. K., Ahammed, G. J., Li, M., Yin, H., & Zhou, J. (2019). Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review. *Molecules*, 24(14), 2558. <https://doi.org/10.3390/molecules24142558>
- Silva-Marrufo**, O., TINOCO, R., & Castañeda-Venegas, J. A. (2020). Effect of Potassium Iodide and Salicylic Acid in the Cultivation of Hydroponic Strawberries (*Fragaria L*) Efecto del Ioduro de Potasio y Ácido Salicílico en el Cultivo de Fresas Hidropónicas (*Fragaria L*). *Economics*, 4(7), 17-23. <https://doi.org/10.19136/era.a10n3.3851>
- Soltani**, F. (2021). Breeding of melon (*Cucumis melo L.* groups *dudaim* and *flexuosus*). *Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops: Volume 9: Fruits and Young Shoots*, 333-361. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-66961-4_9
- St**, L., & Wold, S. (1989). Analysis of variance (ANOVA). *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 6(4), 259-272. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80095-4](https://doi.org/10.1016/0169-7439(89)80095-4)
- Steiner**, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and soil*, 15, 134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- TEC**, P. (2025). Tema: GUÍA DE PREVENCIÓN DE CÁNCER DE TIROIDES EN
- Thakur, N., & Yadav, A. N. (2025). Nanotechnology in agriculture: a review on precision farming and sustainable crop production. *BioNanoScience*, 15(2), 243. <https://doi.org/10.1007/s12668-025-01861-2>
- Torres Quezada**, E. (2023). Basic melon (*Cucumis melo L.*) physiology and morphology (SPES-507NP). Virginia Cooperative Extension. <https://www.pubs.ext.vt.edu/SPES/spes-507/spes-507.html>

- Zhang, H., Wang, H., Yi, H., Zhai, W., Wang, G., & Fu, Q. (2016). Transcriptome profiling of Cucumis melo fruit development and ripening. *Horticulture research*, 3. <https://doi.org/10.1038/hortres.2016.14>
- Treviño-Ruiz**, K. S., Ortega-Ortiz, H., Benavides-Mendoza, A., & González-Morales, S. (2024). Effect of nanochitosan-iodine application in lettuce on biofortification, growth and yield. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 11(2). <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3615>
- Upadhyay**, SK (Ed.). (2020). *ARN largos no codificantes en plantas: su papel en el desarrollo y el estrés*. Prensa académica. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821452-7.00015-5>
- Wang**, G., Xu, M., Wang, W., & Galili, G. (2017). Fortifying horticultural crops with essential amino acids: a review. *International journal of molecular sciences*, 18(6), 1306. <https://doi.org/10.3390/ijms18061306>
- Wehner**, TC, Naegele, RP, Myers, JR, PS, N. y Crosby, K. (2020). *Cucurbitáceas* (Vol. 32). Cabi.
- WHO** (2020). Reducir el consumo de sal. World Health Organization. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/salt-reduction>
- WHO** (2020). World Health Organization. Reducir el consumo de sal. *Obtenido de*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/salt-reduction>
- Yu**, J., Wang, D., Geetha, N., Khawar, K. M., 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.2021.11790>
- Zhao**, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., ... & Ji, R. (2020). Nanobiotechnology in agriculture: use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(7), 1935-1947. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>