

## Aplicación de nanoquitosán-yodo en lechuga y su efecto en la biofortificación, crecimiento y rendimiento

### Effect of nanochitosan-iodine application in lettuce on biofortification, growth and yield

Karla Stephanie Treviño-Ruiz<sup>1</sup> , Hortensia Ortega-Ortiz<sup>2</sup> , Adalberto Benavides-Mendoza<sup>3</sup> ,  
Susana González-Morales<sup>4\*</sup> 

<sup>1</sup>Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

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

<sup>3</sup>Departamento de Horticultura, UAAAN, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>4</sup>CONAHCYT-UAAAN, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

\*Autor de correspondencia: qfb\_sgm@hotmail.com; sgonzalezmo@conahcyt.mx

#### Nota científica

Recibida: 30 de enero 2023

Aceptada: 24 de abril 2024

**RESUMEN.** El yodo (I) es un elemento esencial en la nutrición humana, sin embargo, en las plantas se considera un elemento benéfico. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la aplicación de complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) sobre la biofortificación del I en la lechuga, además de su efecto en el crecimiento y rendimiento. Se realizó la aplicación foliar de los complejos de NPsCs-I en plantas de lechuga donde se midió la altura de planta, diámetro de la cabeza, biomasa seca y contenido de I. La aplicación de los complejos de NPsCs-I tuvo un efecto significativo en el rendimiento, ya que con la aplicación del complejo en dosis de 5 mg L<sup>-1</sup> de KIO<sub>3</sub>, se incrementó en un 30.8% con respecto al testigo. La aplicación foliar de los complejos de NPsCs-I puede significar una alternativa de biofortificación de I y bioestimulación de plantas de lechuga.

**Palabras clave:** Biopolímeros, *Lactuca sativa*, nanotecnología, yodato de potasio, yoduro de potasio.

**ABSTRACT.** Iodine (I) is an essential element in human nutrition, however, in plants it is considered a beneficial element. The objective of the present work was to evaluate the application of nanochitosan-iodine complexes (NPsCs-I) on the biofortification of I in lettuce, in addition to its effect on growth and yield. Foliar application of NPsCs-I complexes was carried out on lettuce plants where plant height, head diameter, dry biomass and I content were measured. The application of NPsCs-I complexes had a significant effect on the yield, since with the application of the complex at a dose of 5 mg L<sup>-1</sup> of KIO<sub>3</sub>, it increased by 30.8% compared to the control. The foliar application of NPsCs-I complexes can provide an alternative for biofortification of I and biostimulation of lettuce plants.

**Keywords:** Biopolymers, *Lactuca sativa*, nanotechnology, potassium iodate, potassium iodide.

**Como citar:** Treviño-Ruiz KS, Ortega-Ortiz H, Benavides-Mendoza A, González-Morales S (2024) Aplicación de nanoquitosán-yodo en lechuga y su efecto en la biofortificación, crecimiento y rendimiento. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(2): e3615. DOI: 10.19136/era.a11n2.3615.

## INTRODUCCIÓN

Entre los microelementos esenciales para el ser humano, el yodo (I) tiene gran importancia para el funcionamiento adecuado de la glándula tiroidea, además de propiedades antioxidantes y como antiproliferativo de células de carcinoma humano (Rösner *et al.* 2016 , Lossow *et al.* 2019). La deficiencia del yodo es un problema de salud que afecta a un tercio de la población mundial (Li *et al.* 2018). La Organización Mundial de la Salud (OMS 2004) contabiliza que existe carencia de yodo en 54 países y se estima que el 40% de la población mundial se encuentra con riesgo de deficiencia de yodo (ATA 2014). En México, Castro-Juárez *et al.* (2022) reportan insuficiencia de yodo en un rango de edad de 6 a 16 años. Además, se reporta en infantes mexicanos un crecimiento lineal insuficiente, condición que ha sido asociada a deficiencia de nutrimentos como el yodo, y la cual se ve acentuada en infantes indígenas (Galván *et al.* 2020).

La deficiencia de yodo se relaciona con enfermedades como bocio, hipertiroidismo, tirotoxicosis y problemas de abortos espontáneos, parto prematuro y anomalías congénitas en los bebés (Taylor *et al.* 2018). Además de la gestación, la lactancia e infancia temprana son las etapas más vulnerables y con mayores secuelas, puesto que puede traer como consecuencia retraso mental, problemas de crecimiento, de la audición y del habla (ATA 2014).

Para prevenir y controlar la carencia de yodo, el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) y la OMS (2014) recomiendan la yodación universal de la sal. Sin embargo, debido a un excesivo consumo de sal en la población a nivel mundial, la OMS ha aplicado estrategias enfocadas en la reducción de un 30% de la ingesta media de sal (WHO 2020). Estas estrategias surgen debido a que el consumo elevado de sal repercute en la salud, contribuyendo a la hipertensión arterial e incrementando el riesgo de padecer cardiopatías y accidentes cerebrovasculares (OPS 2018). Ante esta problemática, una alternativa es el uso de la biofortificación de cultivos comestibles. La cual se define como el procedimiento para mejorar el estado nutricional de los cultivos de alimentos básicos mediante la biodisponibilidad o el aumento de nutrientes, ya sea mediante enfoques agronómicos, mejoramiento convencional o herramientas biotecnológicas (Kyriacou y Roupheal 2018). La biofortificación de cultivos con yodo podría ser una estrategia para aumentar los niveles de yodo en los alimentos derivados de plantas y, por lo tanto, mejorar la nutrición humana (Krzepiřko *et al.* 2019). La ventaja de la biofortificación es que el yodo se encuentra en formas orgánicas que tienen mayor biodisponibilidad y estabilidad comparado con el uso de sales inorgánicas que presentan volatilización (Dávila-Rangel *et al.* 2020). Aplicaciones de yodo han mostrado efectos diversos sobre el aumento en el crecimiento y en la capacidad antioxidante en varias especies; dicha capacidad antioxidante varía dependiendo de las fuentes, la concentración y el tipo de aplicación (Halka *et al.* 2020, Sabatino *et al.* 2021).

Una alternativa para disminuir los efectos de volatilización y aumentar la disponibilidad del yodo, es la biofortificación utilizando biopolímeros como el quitosán (Medrano-Macias *et al.* 2016). Este es un polímero biológico biodegradable que funciona como agente complejante de metales y metales traza, además tiene función de elicitador vegetal, induciendo el sistema de defensa de las plantas (Malerba y Cerana 2016). Gracias a sus propiedades fisicoquímicas es idóneo para ser utilizado en medicina, farmacia y en la agricultura (Stasinska-Jakubas y Hawrylak-Nowak 2022). Además, el quitosán tiene diversas aplicaciones en el campo de la nanotecnología debido a su fácil y controlable extracción, biocompatibilidad, biodegradabilidad, no toxicidad, propiedades

antifúngicas, fácil modificación química, además de su capacidad para formar geles, películas y nanopartículas sólidas (Ashra *et al.* 2019). El nanoquitosán ha sido utilizado en la agricultura como promotor del crecimiento en plantas (*Robusta coffee*), protector contra enfermedades fungosas (arroz) y enfermedades postcosecha (manzana y fresa) (Divya y Jisha 2018). La biofortificación con yodo de plantas de perejil francés se ha estudiado adicionando nanopartículas de Si para aumentar la eficiencia en el contenido de yodo en las plantas (Golubkina *et al.* 2021). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la aplicación vía foliar de complejos de nanoquitosán-yodo (NPsCs-I) en plantas de lechuga para determinar su efecto en la absorción de yodo en la parte comestible, así como en el crecimiento y rendimiento en las plantas de lechuga.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Síntesis de NPsCs y de los complejos NPsCs-I

Para la síntesis de las nanopartículas de Cs se utilizó el método de gelificación ionotrópica reportado por Manikandan y Sathiyabama (2016). La cual se llevó a cabo en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Se utilizó quitosán de la marca Marine Chemicals (Marine, Hydrocolloids, Kerala, India) con peso molecular viscosimétrico de  $200\ 000\ \text{g mol}^{-1}$  y un grado de desacetilación del 84% al 0.5% (p/v) en ácido acético al 1% (v/v). La formación de las NPsCs se llevó a cabo agregando 300 mL de TPP al 0.5% (p/v) y 900 mL de Cs en una relación 10:3 (Cs:TPP) con un tiempo de reacción de 2 h y agitación continua a 51 g. Posteriormente, la suspensión se centrifugó a 10 196 g durante 15 minutos a una temperatura de 5°C. El precipitado se lavó dos veces con agua desionizada para eliminar las sustancias sin reaccionar, centrifugándose 2 veces a 31 752 g durante 15 min a temperatura de 5°C. Finalmente, el precipitado obtenido fue liofilizado.

Para preparar el complejo de nanopartículas con sales de yodo se realizó el procedimiento anterior agregando a la solución 240 mL de las sales de yoduro de potasio (KI) o yodato de potasio ( $\text{KIO}_3$ ) a concentración de 0.1 M, respectivamente. Este procedimiento se realizó inmediatamente después de añadir el TPP.

Para preparar las dispersiones de los complejos de NPsCs-I a concentración de  $25\ \text{mg L}^{-1}$  de sales de yodo se tomó 1 g del complejo y para la concentración de  $5\ \text{mg L}^{-1}$  se tomaron 0.2 g. Posteriormente, se dispersaron en el ultrasonido durante 3 minutos a una amplitud del 50% por tres veces. Adicionalmente, se prepararon las soluciones de sales de KI y  $\text{KIO}_3$ . El tamaño de las NPsCs fue de 140-440 nm y de los complejos NPsCs-I con KI de 60-200 nm y con  $\text{KIO}_3$  de 80-400 nm, presentando todas las nanopartículas una forma esférica.

### Desarrollo del cultivo

El experimento se estableció en un invernadero tipo capilla del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro durante los meses de febrero a mayo de 2022. La temperatura promedio fue de 28 °C y 50 a 60% de humedad relativa. Se utilizaron semillas de lechuga de la variedad Great Lakes. Las semillas fueron sembradas en charolas de germinación utilizando una mezcla de peatmoss y perlita en proporción 1:1 (v/v) como sustrato. A los 30 días fueron trasplantadas a macetas de 10 L, utilizando como sustrato una mezcla de

peatmoss y perlita en proporción 1:1 (v/v), además se adicionó un 10% de vermiculita. La aportación de agua y fertilizantes se realizó mediante un sistema de riego por goteo. Se aplicó una solución nutritiva al riego, empezando con una dosis del 25% de solución Steiner (1961), la cual se incrementó hasta el 100% durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo. En total se realizaron cuatro aplicaciones de manera foliar de los tratamientos, siendo la primera al momento del trasplante y posteriormente cada 15 días.

### Diseño experimental

El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar. Cada bloque consistió en 10 tratamientos los cuales se describen a continuación: testigo absoluto, NPsCs (Mv = 200 000), yoduro de potasio a concentración de 5 mg L<sup>-1</sup>, yoduro de potasio a concentración de 25 mg L<sup>-1</sup>, complejo de NPsCs-I con 5 mg L<sup>-1</sup> KI, complejo de NPsCs-I con 25 mg L<sup>-1</sup> KI, yodato de potasio a concentración de 5 mg L<sup>-1</sup>, yodato de potasio a concentración de 25 mg L<sup>-1</sup>, complejo de NPsCs-I con 5 mg L<sup>-1</sup> KIO<sub>3</sub>, complejo de NPsCs-I con 25 mg L<sup>-1</sup> KIO<sub>3</sub>.

La unidad experimental constó de 6 plantas y se tuvieron en total tres bloques. Los tratamientos consistieron en evaluar las NPsCs-I con dos fuentes distintas de yodo (yoduro de potasio y yodato de potasio), y dos concentraciones de yodo diferentes (5 y 25 mg L<sup>-1</sup>). Se evaluaron también las dos fuentes de yodo por separado en ambas concentraciones además de evaluar las NPsCs sin yodo.

### Variables evaluadas

Se determinaron variables agronómicas de altura de planta y diámetro ecuatorial de la cabeza, las cuales se midieron con el uso de un flexómetro (cm). Para medir la biomasa seca aérea y radicular, el tejido se secó en una estufa de secado a temperatura de 70 °C durante 3 días, posteriormente se registró el peso (g) con una balanza analítica. El rendimiento se registró pesando la cabeza de la lechuga en una balanza analítica. Todas las variables se determinaron en dos plantas por repetición a los 60 días después del trasplante (DDT). Además, se determinó el contenido de yodo en la parte comestible en muestras de hojas de lechuga a los 60 DDT. La determinación del yodo se realizó en el tejido seco de dos plantas por tratamiento y bloque, con la técnica de cenizas alcalinas de Fisher *et al.* (1986) en un equipo de espectroscopía de emisión atómica de inducción por plasma (ICP-OES Agilent 725). Se pesaron 500 mg del tejido vegetal seco (cabeza de lechuga) previamente molido. La muestra se colocó en un crisol y posteriormente se agregaron 2 mL de KOH 2 M y 1 mL de KNO<sub>3</sub> 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 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 el ICP-OES.

## Análisis de datos

Los datos obtenidos para cada variable fueron sometidos al análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples de medias de DMS Fisher ( $p \leq 0.05$ ) con el software para análisis estadístico InfoStat.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variables agronómicas

La aplicación de los complejos de NPsCs-I en el cultivo de lechuga tuvo efecto en la altura de planta y el rendimiento (DMS Fisher  $p \leq 0.05$ ). Mientras que las variables de diámetro ecuatorial y biomasa seca aérea y radicular, no presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 1). El mayor rendimiento del cultivo ( $940.5 \text{ g planta}^{-1}$ ) se encontró con la aplicación del complejo de NPsCs-I en dosis de  $5 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{KIO}_3$ , lo cual representa un incremento del 30.8% con respecto al testigo. Mientras que la aplicación de KI en una dosis de  $25 \text{ mg L}^{-1}$  mostró una disminución en la altura de planta del 14.4% con respecto al testigo. La aplicación de los complejos de NPsCs con sales de KI y  $\text{KIO}_3$  no tuvieron un efecto significativo sobre la altura de las plantas en ninguna dosis aplicada. Algunos estudios reportan efectos benéficos del yodo, incluyendo un mejor crecimiento y cambios en la tolerancia al estrés y capacidad antioxidante, mientras que otros estudios reportan que las aplicaciones de yodo no provoca respuesta o incluso tienen efectos adversos en las plantas (Dávila-Rangel *et al.* 2019). Estos resultados contradictorios, se pudieran explicar considerando la posible interacción del yodo con otros oligoelementos (Fe, Mn, Cu y V), así como las diferentes condiciones fisicoquímicas y biogeoquímicas que dan lugar a la distinta disponibilidad y volatilización del yodo (Medrano-Macías *et al.* 2016).

**Tabla 1.** Efecto de los complejos de nanoquitosán-yodo sobre las variables agronómicas en lechuga.

Tratamientos	Altura de planta (cm planta <sup>-1</sup> )	Diámetro ecuatorial (cm planta <sup>-1</sup> )	Rendimiento (g planta <sup>-1</sup> )	Biomasa seca aérea (g planta <sup>-1</sup> )	Biomasa seca de raíz (g planta <sup>-1</sup> )
Testigo absoluto	35.4 <sup>a</sup>	15.8 <sup>a</sup>	719 <sup>b</sup>	27.7 <sup>a</sup>	2.4 <sup>a</sup>
NPsCs	32.4 <sup>ab</sup>	16.3 <sup>a</sup>	783 <sup>ab</sup>	29.5 <sup>a</sup>	2.4 <sup>a</sup>
KI-5	32.2 <sup>ab</sup>	18.1 <sup>a</sup>	803.7 <sup>ab</sup>	27.6 <sup>a</sup>	2.6 <sup>a</sup>
KI-25	30.3 <sup>b</sup>	16.9 <sup>a</sup>	773.7 <sup>ab</sup>	25.1 <sup>a</sup>	1.7 <sup>a</sup>
NPsCs-KI-5	31.1 <sup>ab</sup>	16.9 <sup>a</sup>	773.6 <sup>ab</sup>	27.6 <sup>a</sup>	2.4 <sup>a</sup>
NPsCs-KI-25	34.9 <sup>ab</sup>	16.7 <sup>a</sup>	778.4 <sup>ab</sup>	27.8 <sup>a</sup>	2.1 <sup>a</sup>
$\text{KIO}_3$ -5	33.9 <sup>ab</sup>	16.1 <sup>a</sup>	686.1 <sup>b</sup>	26.2 <sup>a</sup>	2.2 <sup>a</sup>
$\text{KIO}_3$ -25	32.5 <sup>ab</sup>	16.7 <sup>a</sup>	703 <sup>b</sup>	27.2 <sup>a</sup>	2.2 <sup>a</sup>
NPsCs- $\text{KIO}_3$ -5	32.6 <sup>ab</sup>	17.9 <sup>a</sup>	940.5 <sup>a</sup>	26.8 <sup>a</sup>	2.3 <sup>a</sup>
NPsCs- $\text{KIO}_3$ -25	31.1 <sup>ab</sup>	16.0 <sup>a</sup>	869.4 <sup>ab</sup>	26.2 <sup>a</sup>	1.9 <sup>a</sup>

Donde NPsCs: nanoquitosán, KI: yoduro de potasio y  $\text{KIO}_3$ : yodato de potasio. Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos ( $p \leq 0.05$ ).

Una posible explicación del aumento en el rendimiento en las plantas de lechuga con la aplicación de los complejos de NPsCs-I radica en que en investigaciones recientes sobre el papel del yodo en las plantas revelaron que el efecto benéfico de la biofortificación con yodo puede relacionarse con la incorporación de este elemento en las proteínas vegetales, impactando en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Kiferle *et al.* 2021). Además del yodo, las NPsCs también pudieron influenciar un efecto de promoción de crecimiento y rendimiento. Ya que formulaciones de NPsCs mostraron actividades prometedoras al promover la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas en trigo, tomate y otras especies de plantas (Chun y Chandrasekaran 2019, Li *et al.* 2019).

La producción de biomasa en las plantas de lechuga no mostró un efecto con la aplicación de los complejos de NPsCs-I, lo que coincide con Dávila-Rangel *et al.* (2020) quienes reportan la viabilidad del uso de complejos de Cs-I, especialmente con  $\text{KIO}_3$ , como una alternativa para biofortificar cultivos con yodo. Un factor importante en las respuestas a la aplicación de yodo es la forma de aplicación. La aplicación foliar de NPsCs mejoró el crecimiento, el rendimiento y el contenido mineral en *Panicum miliaceum* L. (Sathiyabama y Manikandan 2021). Sin embargo, en futuras investigaciones se podría evaluar la aplicación de los complejos de NPsCs-I directo al suelo o sustrato, para así evaluar su biodisponibilidad.

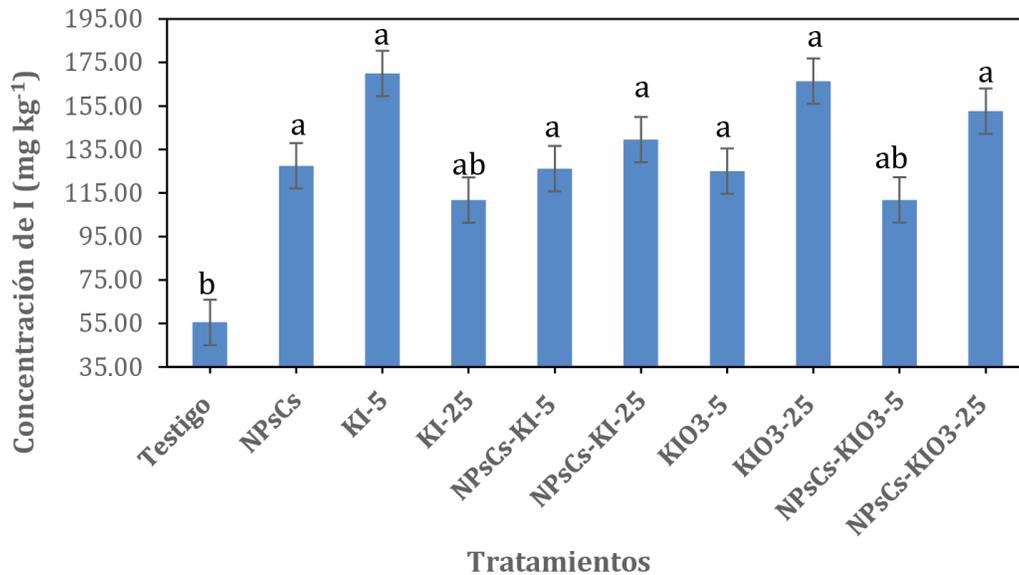
Se observó una reducción en altura de planta con la aplicación de KI a  $25 \text{ mg L}^{-1}$ , lo cual se ha observado en especies como la albahaca donde altos niveles de yodo en la solución nutritiva han provocado reducción de la expansión de la hoja y en la actividad fotosintética, lo cual fue atribuido a una gran acumulación de este elemento en los tejidos foliares (Incrocci *et al.* 2019).

### Contenido de yodo

En el contenido de yodo se observó un incremento significativo en la mayoría de los tratamientos con respecto al testigo, con excepción de KI  $25 \text{ mg L}^{-1}$  y NPsCs- $\text{KIO}_3$   $5 \text{ mg L}^{-1}$  que fueron similares al testigo (DMS Fisher  $\leq 0.05$ ) (Figura 1). Se observó que la aplicación de complejos de NPsCs con sales de KI en dosis de  $5 \text{ mg L}^{-1}$  incrementó el contenido de yodo en un 127.4% con respecto al testigo, al aumentar la dosis de yodo ( $25 \text{ mg L}^{-1}$ ) se obtuvo un incremento del 151.3%. En cuanto a la aplicación de complejos de NPsCs con sales  $\text{KIO}_3$ , el tratamiento con la dosis menor no presentó diferencias significativas respecto al testigo, mientras que la dosis mayor ( $25 \text{ mg L}^{-1}$ ) presentó incremento del 175% con respecto al testigo. Los tratamientos solo con las sales de KI ( $5 \text{ mg L}^{-1}$ ) y  $\text{KIO}_3$  ( $5$  y  $25 \text{ mg L}^{-1}$ ) también incrementaron la concentración de yodo con respecto al testigo. Caso similar se presentó con el tratamiento de las NPsCs, donde se observó incremento en la concentración de yodo. Estos resultados difieren con Dávila-Rangel *et al.* (2020), quienes reportan que el mayor contenido de yodo en las hojas se presentaba al aplicar solo las sales de KI y  $\text{KIO}_3$  (sin acomplejar con Cs), obteniendo el valor más alto ( $103.16 \text{ mg kg}^{-1}$ ) al usar  $\text{KIO}_3$  en  $25 \text{ mg kg}^{-1}$ . En cambio, en los resultados del presente trabajo, la mayoría de los tratamientos evaluados (complejos NPsCs-I y sales de yodo) aplicados de forma foliar presentaron incrementos en el contenido de yodo, con valores de contenido entre  $125$  - $170 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por lo que se pudiera inferir que en la biofortificación con yodo es más efectiva la aplicación foliar en el cultivo de lechuga.

En lo referente a la fuente de yodo para la biofortificación de hortalizas se han utilizado fuentes naturales (algas marinas), orgánicas y sales de yodato ( $\text{KIO}_3$ ) y yoduro (KI). En sus formas inorgánicas de KI y  $\text{KIO}_3$  (Krzepiřko *et al.* 2019). En los suelos, las plantas absorben más

eficientemente el  $KIO_3$  en comparación con el KI, y en cultivos sin suelo, la aplicación de KI induce toxicidad más fácilmente en las plantas que el  $KIO_3$  (Medrano-Macías *et al.* 2016).



**Figura 1.** Contenido de yodo en plantas de lechuga tratadas con complejos de nanoquitosán-yodo. Letras distintas representan diferencias significativas entre tratamientos ( $p \leq 0.05$ ). Las líneas sobre las barras indican el error estándar.

El yodo es un elemento que puede ser absorbido por la raíz y por las estructuras aéreas tanto por los estomas como por la cutícula (Tschiersch *et al.* 2009). Una vez absorbido, se transporta a través del xilema, y su redistribución a través del floema es baja; por lo que se acumula en mayor cantidad en hojas que en frutos y semillas (Medrano-Macías *et al.* 2016). Algunos trabajos sugieren que algunas hortalizas de hoja como lechuga y albahaca son aptas para la biofortificación con yodo al producir hojas comestibles que suplan la necesidad de yodo (Pucchinelli *et al.* 2021). Hortalizas como el repollo, apio y la col también han sido estudiadas (Li *et al.* 2018). Mientras que Lawson *et al.* (2016) mencionan que las concentraciones de yodo en las partes comestibles de lechuga (*Lactuca sativa*) aumentaron cuando se aplicaron vía foliar las soluciones de KI y  $KIO_3$  en diferentes fechas cercanas a la cosecha.

Una explicación del porqué en la dosis baja de NPsCs-I con  $KIO_3$  se incrementó el yodo con respecto al testigo, podría ser que el  $KIO_3$  para ser absorbido, primero debe reducirse a I<sup>-</sup>, proceso que realiza la enzima yodato reductasa (Kato *et al.* 2013). Entonces, cuando el  $KIO_3$  se compleja con las NPsCs, el proceso de reducción lleva más tiempo, por lo tanto, a dosis baja su biodisponibilidad podría ser más lenta. En el presente trabajo, el tratamiento con NPsCs presentó un incremento de concentración de yodo, lo que pudiera suponer un problema de contaminación con alguna fuente de yodo en este tratamiento. Los resultados en la literatura indican que ni las especies químicas aplicadas ni la forma de aplicación del yodo (es decir, fertirrigación, aspersión foliar, solución nutritiva) tienen un efecto consistente entre diferentes cultivos, por lo que se necesita más investigación sobre la biofortificación con yodo y el uso de biopolímeros para mejorar la biodisponibilidad de este elemento.

La aplicación foliar del complejo de NPsCs-I en una dosis de 5 mg L<sup>-1</sup> de KIO<sub>3</sub> bajo condiciones de invernadero influyó de manera significativa en el rendimiento del cultivo de lechuga. Mientras que la aplicación foliar de los complejos de NPsCs-I en sus dos formas químicas al igual que las sales sin Cs incrementaron la absorción de yodo en hojas de lechuga.

## AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por el apoyo mediante el proyecto A1-S-20923, a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y al Centro de Investigación en Química Aplicada para la realización de este estudio.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## LITERATURA CITADA

- Ashra B, Rashidipour M, Marzban A, Soroush S (2019) *Mentha piperita* essential oils loaded in a chitosan nanogel with inhibitory effect on biofilm formation against *S. mutans* on the dental surface. *Carbohydrate Polymers* 212: 142-149. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.02.018
- ATA (2014) Deficiencia de I. American Thyroid Association. [https://www.thyroid.org/wpcontent/uploads/patients/brochures/espanol/deficiencia\\_de\\_i.pdf](https://www.thyroid.org/wpcontent/uploads/patients/brochures/espanol/deficiencia_de_i.pdf). Fecha de consulta: 17 de octubre de 2022.
- Castro-Juárez C, Ramírez-García S, López-Toledo S, Juárez Pérez MH, Villa-Ruano N (2022) Perfil nutricional de la dieta en la Casa del Niño Indígena CDI de Oaxaca, México. *Revista Española de Nutrición Comunitaria* 28(2): 1-12.
- Chun SC, Chandrasekaran M (2019) Chitosan and chitosan nanoparticles induced expression of pathogenesis-related proteins genes enhances biotic stress tolerance in tomato. *International Journal of Biological Macromolecules* 125: 948-954. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.167>
- Dávila-Rangel I, Leija-Martínez P, Medrano-Macías J, Fuentes-Lara LO, González-Morales S, Juárez-Maldonado A, Benavides-Mendoza A (2019) Iodine biofortification of crops. In: Jaiwal PK, Chhillar AK, Chaudhary D, Jaiwal RJ (ed) *Nutritional Quality Improvement in Plants*, Springer Nature, Switzerland. pp: 79-113.
- Dávila-Rangel I, Trejo L, Ortega H, Maldonado A, González S, Companioni B, Benavides A (2020) Comparison of iodine, iodate and iodine-chitosan complexes for the biofortification of lettuce. *Applied Science* 10: 2378. <https://doi.org/10.3390/app10072378>
- Divya K, Jisha M (2018) Chitosan nanoparticles preparation and applications. *Environmental Chemistry Letters* 16: 101-112.
- Fisher PWF, L'Abbe MR, Giroux A (1986) Colorimetric determination of total iodine in foods by iodide-catalyzed reduction of Ce<sup>+4</sup>. *Journal of Association of Official Analytical Chemists* 69: 687-689. <https://doi.org/10.1093/jaoac/69.4.687>
- Galván M, Fernández TL, Suárez-Diéguez T, López-Rodríguez G (2020) Estado nutricional de I en niños escolares mexicanos de zonas urbanas y rurales. *Endocrinología, Diabetes y Nutrición* 67(4): 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.endinu.2019.09.003>
- Golubkina N, Moldovan A, Fedotov M, Kekina H, Kharchenko V, Folmanis G, Alpatov A, Caruso G (2021) Iodine and selenium biofortification of chervil plants treated with silicon nanoparticles. *Plants* 10: 2528. <https://doi.org/10.3390/plants10112528>

- Halka M, Smoleń S, Ledwożyw SI (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>
- Incrocci L, Carmassi G, Maggini R, Poli C, Saidov D, Tamburini C, Kiferle C, Perata P, Pardossi A (2019) Iodine accumulation and tolerance in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) with green or purple leaves grown in floating system technique. *Frontiers in Plant Science* 10: 1494. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01494>
- Kato S, Wachi T, Yoshihira K, Nakagawa T, Ishikawa A, Takagi D, Takahashi M (2013) Rice (*Oryza sativa* L.) roots have iodate reduction activity in response to iodine. *Frontiers in Plant Science* 4: 227-238. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00227>
- Kiferle C, Martinelli M, Salzano AM, Gonzali S, Beltrami S, Salvadori PA, Hora K, Holwerda HT, Scaloni A, Perata P (2021) Evidences for a nutritional role of iodine in plants. *Frontiers in Plant Science* 12: 616868. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
- Krzepińko A, Prazak R, Skwaryło-Bednarz B, Molas J (2019) Agronomic biofortification as a means of enriching plant foodstuffs with iodine. *Acta Agrobotanica* 72(2): 1766. <https://doi.org/10.5586/aa.1766>
- Kyriacou M, Rouphael 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>
- Lawson P, Daum D, Czuderna R, Vorsatz C (2016). Factors influencing the efficacy of iodine foliar sprays used for biofortifying butterhead lettuce (*Lactuca sativa*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179 (5): 661-669. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600213>
- Li R, Li DW, Yan AL, Hong CL, Liu HP, Pan LH, Song MY, Dai ZX, Ye ML, Weng HX (2018) The bioaccessibility of iodine in the biofortified vegetables throughout cooking and simulated digestion. *Journal of Food Science and Technology* 55: 366–375. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2946-4>
- Li R, He J, Xie H, Wang W, Kumar S, Sun Y, Hu J, Yin H (2019) Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Biological Macromolecules* 126: 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.118>
- Lossow K, Schwerdtle T, Kipp A (2019) Selenium and iodine—essential trace elements for the thyroid. *Ernaehrungs Umschau* 66: 175-180. <https://doi.org/10.4455/eu.2019.032>
- Malerba M, Cerana R (2016) Chitosan effects on plant systems. *International Journal of Molecular Sciences* 17(7): 996-1011. <https://doi.org/10.3390/ijms17070996>
- Manikandan A, Sathiyabama M (2016) Preparation of chitosan nanoparticles and its effect on detached rice leaves infected with *Pyricularia grisea*. *International Journal of Biological Macromolecules* 84: 58-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.083>
- Medrano-Macías J, Leija-Martínez P, González-Morales S, Juárez-Maldonado A, Benavides-Mendoza A (2016) Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops. *Frontiers in Plant Science* 7: 1146. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01146>
- OMS (2004) La eliminación mundial de la carencia de I está a nuestro alcance. Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/mediacentre/news/releases/2004/pr93/es/index.html>. Fecha de consulta: 17 de octubre de 2022.
- OMS (2014) Concentraciones de I en orina para establecer estado nutricional de I en poblaciones. Organización Mundial de la Salud. Sistema de Información Nutricional sobre Vitaminas y Minerales. Ginebra: Organización Mundial de la Salud WHO/NMH/NHD/EPG/14.2. [https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/130836/WHO\\_NMH\\_NHD\\_EPG\\_14.3\\_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/130836/WHO_NMH_NHD_EPG_14.3_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Fecha de consulta: 17 de octubre de 2022.
- OPS (2018) SHAKE menos sal, más salud. Guía técnica para reducir el consumo de sal. Organización Panamericana de la Salud. 58p. <https://www.paho.org/es/documentos/shake-menos-sal-mas-salud-guia-tecnica-para-reducir-consumo-sal>. Fecha de consulta: 17 de octubre de 2022.
- Puccinelli M, Landi M, Maggini R, Pardossi A, Incrocci L (2021) Iodine biofortification of sweet basil and lettuce grown in two hydroponic systems. *Scientia Horticulturae* 276: 109783. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109783>
- Rösner H, Möller W, Groebner S, Torremante P (2016) Antiproliferative/cytotoxic effects of molecular iodine, povidone-iodine and Lugol's solution in different human carcinoma cell lines. *Oncology letters* 12(3): 2159-2162. <https://doi.org/10.3892/ol.2016.4811>

- Sabatino L, Di GF, Consentino BB, Roupael Y, El-Nakhel C, Bella S, Vasto S, Mauro RP, D'Anna F, Iapichino G, Caldarella R, De Pasquale C (2021) Iodine biofortification counters micronutrient deficiency and improve functional quality of open field grown curly endive. *Horticulturae* 7(3): 58-74. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030058>
- Sathiyabama M, Manikandan A (2021) Foliar application of chitosan nanoparticle improves yield, mineral content and boost innate immunity in finger millet plants. *Carbohydrate Polymers* 15(258): 117691. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117691>
- Stasinska-Jakubas M, Hawrylak-Nowak B (2022) Protective, biostimulating, and eliciting effects of chitosan and its derivatives on crop plants. *Molecules* 27: 2801. <https://doi.org/10.3390/molecules27092801>
- Steiner A (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15(2): 134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Taylor PN, Albrecht D, Scholz A, Buey G, Lazarus JH, Colin MD (2018) Global epidemiology of hyperthyroidism and hypothyroidism. *Nature Reviews Endocrinology* 2014: 301-16. <https://doi.org/10.1038/nrendo.2018.18>
- Tschiersch J, Shinonaga T, Heuberger H (2009) Dry deposition of gaseous radioiodine and particulate radiocaesium onto leafy vegetables. *Science of the total environment* 407(21): 5685-5693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.025>
- WHO (2020) Reducir el consumo de sal. World Health Organization. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/salt-reduction>. Fecha de consulta: 17 de octubre de 2022.