

BIOFORTIFICACIÓN CON YODO, ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y MINERALES EN FRUTOS DE BERENJENA (*Solanum melongena* L.)

IODINE BIOFORTIFICATION AND ANTIOXIDANT ACTIVITY IN EGGPLANT FRUITS (*Solanum melongena* L.)

Ana Y. Lara-Izaguirre¹, Ángel N. Rojas-Velázquez^{1*}, Jorge A. Alcalá-Jáuregui¹, Irán Alía-Tejaca², Heriberto Méndez-Cortés¹ y Alejandra Hernández-Montoya¹

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. ²Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Cuernavaca, Morelos, México.

*Autor de correspondencia (angel.rojas@uaslp.mx)

RESUMEN

El yodo (I) es un elemento esencial en la salud humana, su deficiencia en los alimentos lleva a una ingesta insuficiente de este elemento. El uso de yodo en la biofortificación de los cultivos mejora la calidad nutricional de los alimentos. En el presente estudio se evaluó el efecto del yoduro de potasio (KI) aplicado al cultivo de berenjena, sobre la concentración de yodo y actividad antioxidante en los frutos. Se cultivaron plantas de berenjena bajo cuatro dosis de KI: 0, 30, 60 y 90 µM, con ocho repeticiones, en un diseño completamente al azar. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza y una comparación de medias con la prueba de Tukey. Las variables evaluadas fueron altura de planta, área foliar, número de hojas, biomasa aérea, rendimiento y firmeza del fruto. En los frutos se evaluaron sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT), vitamina C, flavonoides totales, fenoles totales, actividad antioxidante y concentración de minerales Mg, Fe, Zn, Mn e I. Las dosis de KI no afectaron la altura de planta, número de hojas, biomasa aérea y rendimiento. El uso de yodo en berenjena aumentó el área foliar con dosis de 60 y 90 µM. En el fruto, las dosis de 30 y 60 µM disminuyeron los SST, mientras que la de 90 µM disminuyó la concentración de fenoles. Las dosis de 60 y 90 µM aumentaron en 34 % la actividad antioxidante y la dosis de 90 µM incrementó en 25 % el contenido de Zn y en 34 % el de Mn. La concentración de yodo aumentó 64 a 90 % con todas las dosis de KI utilizadas. El utilizar yodo como biofortificador en berenjena mejora la calidad nutricional, debido a que aumenta su concentración en los frutos, sin afectar el crecimiento del cultivo.

Palabras clave: *Solanum melongena* L., actividad antioxidante, biofortificación, compuestos bioactivos, yodo.

SUMMARY

Iodine (I) is an essential element in human health, its deficiency in food leads to insufficient intake of this element. The use of iodine in crop biofortification improves the nutritional quality of food. In this study the effect of potassium iodide (KI) applied to eggplant crop on iodine concentration and antioxidant activity in fruits was evaluated. Eggplant plants were grown at four doses of KI: 0, 30, 60 and 90 µM with eight replications under a completely randomized design. The data were analyzed by analysis of variance and comparison of means with the Tukey test. The variables evaluated were plant height, leaf area, number of leaves, aerial biomass, yield and fruit firmness. In fruits, total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), vitamin C, total flavonoids, total phenols, antioxidant activity and mineral concentration of Mg, Fe, Zn, Mn and I were evaluated. KI doses did not affect plant height, leaf number, aerial biomass and yield. The use of iodine in plants increased leaf area with doses

of 60 and 90 µM. Doses of 30 and 60 µM decreased SST concentration in fruits, while that of 90 µM decreased phenols concentration. Doses of 60 and 90 µM increased antioxidant activity by 34 %, and that of 90 µM increased Zn content by 25 % and Mn by 34 %. Iodine concentration increased from 64 to 90 % with all doses of KI used. Using iodine as a biofortifier in eggplant improves the nutritional quality, because it increases its concentration in the fruits, without affecting the growth of the crop.

Index words: *Solanum melongena* L., antioxidant activity, bioactive compounds, biofortification, iodine.

INTRODUCCIÓN

El yodo (I) es un elemento esencial para la salud humana (Dobosy *et al.*, 2020b), crucial para el correcto funcionamiento del organismo, participa en la biosíntesis de las hormonas tiroideas que regulan procesos fisiológicos y bioquímicos (Smoleń *et al.*, 2015). La desnutrición por yodo da lugar a problemas de salud que afectan a todas las edades. En el caso de las plantas, el yodo no se considera un elemento esencial (Sarrou *et al.*, 2019), pero afecta los procesos fisiológicos y bioquímicos (Smoleń *et al.*, 2017), cambiando su composición química, por lo que es necesario determinar dosis que permitan obtener el efecto de biofortificación (Smoleń *et al.*, 2015). Los fertilizantes minerales se usan para biofortificar debido a que mejoran el contenido nutricional de los alimentos de origen vegetal (Carvalho y Vasconcelos, 2013). El enriquecimiento con yodo de frutas y verduras aumenta la ingesta de yodo de los seres humanos (Dobosy *et al.*, 2020b).

Cada especie y cultivar tolera un intervalo específico de concentración de yodo que permite la biofortificación, y cantidades más altas causan toxicidad (Dávila-Rangel *et al.*, 2019). En los frutos, el yodo mejora la calidad nutricional, concentración de vitaminas, azúcares, fenoles (Smoleń *et al.*, 2017), minerales (Dobosy *et al.*, 2020a), actividad antioxidante (Kiferle *et al.*, 2013) y compuestos bioactivos (Sarrou *et al.*, 2019). En frutos de pimiento, dosis de 0.25

a 0.50 mg L⁻¹ de KI aumentan la concentración de yodo, y dosis de 0.50 a 1.00 mg L⁻¹ aumentan vitamina C y °Brix (Li *et al.*, 2017). En frutos de tomate, dosis de 7.88 µM de KI y de KIO₃ aumentan la concentración de yodo, vitamina C y los compuestos fenólicos (Smoleń *et al.*, 2015), 5 mM de KI aumenta la actividad antioxidante, de 1 a 5 mM de KI y de 0.5 a 2 mM de KIO₃ aumentan la concentración de yodo en frutos de tomate (Kiferle *et al.*, 2013). En lechuga, dosis de 10 µM KI aumenta la actividad antioxidante y la concentración de yodo (Puccinelli *et al.*, 2021).

Dentro de la familia de las solanáceas, la berenjena (*Solanum melongena* L.) es una especie de importancia agronómica y económica y tiene gran cantidad de compuestos bioactivos, incluyendo fenoles, alcaloides, antioxidantes y vitaminas, los cuales son benéficos para la salud (Gürbüz *et al.*, 2018), debido a su capacidad para proteger contra el daño celular oxidativo que puede provocar enfermedades cardíacas, Alzheimer y cáncer (Rajendran *et al.*, 2014). En el cultivo de berenjena, para aumentar la concentración de vitamina C y la actividad antioxidante en los frutos, se han utilizado prácticas como el estrés salino (Lara-Izaguirre *et al.*, 2022); además, mayores aplicaciones de fertilizantes aumentan las concentraciones de micronutrientes como Cu, Zn, Fe y Mn en los frutos (Bana *et al.*, 2022). En este contexto, es importante determinar niveles de aplicación de yodo como biofortificador de frutos de berenjena, para mejorar la calidad nutricional y los compuestos bioactivos, sin provocar efectos tóxicos en las plantas. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del yodo en la biofortificación del cultivo de berenjena, y evaluar la actividad antioxidante y concentración de minerales en los frutos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El experimento se realizó en el año 2020 en los invernaderos de hidroponía de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, ubicada en San Luis Potosí, México. Se utilizó un invernadero de plástico tipo túnel de dimensiones 5 × 9 m. El ciclo de cultivo fue verano-otoño (195 días de junio a diciembre), con temperatura media de 20.0 °C y una luminosidad media de 394.8 µmol m⁻¹ s⁻¹, medidos con un registrador data logger (HOBO Onset UA-002-08, Bourne, Maryland, EUA).

Material genético y manejo del experimento

Se utilizaron semillas de berenjena de la variedad Black Beauty (Caloro®) con un porcentaje de germinación del

85 %, se sembraron en charolas de poliestireno con 220 cavidades, con un sustrato comercial a base de turba ácida BM2 Berger®. A los 75 días después de la siembra, cuando las plántulas tenían cuatro hojas verdaderas, se trasplantaron a macetas de plástico negro de 10 L, con tezontle rojo como sustrato con una granulometría de 5 a 6 mm, bajo un sistema de riego por goteo.

Para el riego del cultivo se utilizó la solución universal de Steiner (1984). Se utilizaron los fertilizantes Ca(NO₃)₂ · 4 H₂O, KNO₃, MgSO₄ · 7H₂O, K₂SO₄ y H₃PO₄. Los micronutrientes se añadieron a partir de Carboxy® Micro, el cual aportó Fe 5 %, Zn 2.5%, Mn 1 %, Mg 0.5 % y B 0.5 % en forma quelatada EDDHA. El pH de la solución se ajustó a 5.5 con H₃PO₄.

Tratamientos, diseño y unidad experimental

Se aplicaron cuatro tratamientos de KI (KaraI®) a la solución Steiner en dosis de 0 (testigo), 30, 60 y 90 µM al inicio de la floración (91 ddt), los cuales se establecieron en un diseño completamente al azar con ocho repeticiones. La unidad experimental fue una planta.

Variables evaluadas

Altura, área foliar, número de hojas, peso seco y rendimiento

Al final de la cosecha, se evaluó la altura de las plantas con una cinta métrica, se reportó en cm. El área foliar se midió en cm² con un medidor laser de área foliar (CI-202 CID Bio-Science, Camas, Washington, EUA). El número de hojas se contó de forma visual. Para el peso seco de la parte aérea (tallos y hojas) se utilizó una estufa de secado de aire forzado (Omron, Kyoto, Japón) a 70 °C durante 72 h hasta obtener peso constante en g, medido en una balanza digital (Ohaus® PAJ4102N Gold series, Parsippany, New Jersey, EUA). Se cosecharon frutos maduros a partir de los 98 días después de la aplicación de los tratamientos, se pesaron en una balanza digital (Ohaus® PAJ4102N Gold series), el rendimiento se reportó en g por planta.

Análisis de los frutos

La firmeza se midió con un penetrómetro (QA Supplies, Norfolk, Virginia, EUA) con punta de émbolo de 11 mm, se reportó en kg. Para las determinaciones de sólidos solubles totales, acidez titulable, vitamina C, flavonoides totales, fenoles totales y actividad antioxidante se cosecharon frutos maduros a partir de los 98 días después de la aplicación de los tratamientos, se lavaron con agua destilada y se guardaron en un congelador a -80 °C hasta su análisis.

Sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable (AT)

Se obtuvieron los extractos al homogenizar 1 g de pulpa en 12 mL de agua destilada, en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX®, IKA, Staufen, Alemania) y se filtraron. Los SST se determinaron colocando dos gotas de muestra en un refractómetro digital de bolsillo (PAL-1, Atago®, Tokio, Japón) y los resultados se reportaron en °Brix. La AT se determinó de acuerdo con la metodología de la AOAC (1990), se usó fenoltaleína como indicador y los resultados se expresaron como % de ácido cítrico.

Vitamina C

El ácido ascórbico se determinó de acuerdo con el método colorimétrico descrito por Jagota y Dani (1982) con algunas modificaciones. Se preparó extracto para el análisis de vitamina C, se homogenizaron 2.0 g de pulpa en 8 mL de ácido tricloroacético (TCA) en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX®, IKA) y se centrifugó a 12000 rpm por 5 min a 4 °C. Se midió la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (GENESYS 10S, Thermo Scientific™, Waltham, Massachusetts, EUA). La curva de calibración se hizo utilizando ácido ascórbico (AA) y los resultados se reportan en µg AA 100 g⁻¹ de peso fresco.

Flavonoides totales

Se determinaron con el método de tricloruro de aluminio (AlCl₃) de acuerdo con Arvouet-Grand *et al.* (1994) con algunas modificaciones. Para el extracto, se homogeneizaron 2 g de pulpa en 10 mL de metanol absoluto y 0.2 g de cáscara en 10 mL de metanol absoluto en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX®, IKA) y se filtró. La absorbancia de las muestras se midió a 415 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (GENESYS 10S, Thermo Scientific™). Se elaboró una curva estándar de quercetina y los resultados se expresaron en mg de quercetina (EQ) 100 g⁻¹ de peso fresco.

Fenoles totales y actividad antioxidante

Para estas dos determinaciones se preparó el extracto mediante homogenización de 1 g de pulpa en 10 mL de agua desionizada y 1 g de cáscara en 10 mL de agua desionizada en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX®, IKA) y se filtró, luego se centrifugó a 2000 g por 15 min.

Los fenoles totales se determinaron con el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu, como lo describen Waterman y Mole (1994), con algunas modificaciones. Se midió la absorbancia a 760 nm. La curva estándar se realizó usando ácido gálico y los resultados se expresaron

en mg de ácido gálico (EAG) 100 g⁻¹ de peso fresco.

La actividad antioxidante se determinó mediante el método de ABTS de acuerdo con Re *et al.* (1999), con algunas modificaciones. Se midió la absorbancia a 734 nm. La curva de calibración se realizó con ácido ascórbico y los resultados se expresaron en mg de ácido ascórbico (AA) 100 g⁻¹ de peso fresco.

Minerales en los frutos

Se cosecharon frutos maduros a partir de los 98 días después de la aplicación de los tratamientos, se lavaron con agua destilada y se secaron en una estufa de secado de aire forzado (Omron, Kyoto, Japón) a 70 °C hasta obtener peso constante. Los frutos secos se molieron en un molino (Krupps, México). Se pesó 1 g de muestra y se incineró en mufla a 450 °C, se agregó HNO₃ 1 % (digestión seca), se filtró y se completó a 25 mL en un matraz aforado para el análisis de I, Zn, Mn, Fe y Mg mediante el uso de la técnica ICP-MS (Thermo Scientific™, USA).

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizó análisis de varianza y pruebas de comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) por medio del programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9.0 (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura, área foliar, número de hojas, biomasa seca aérea y rendimiento

Con las dosis de KI aplicadas a las plantas no se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en altura, número de hojas y biomasa seca (Cuadro 1). El efecto que causa el yodo sobre la producción de biomasa no es concluyente, ya que varios estudios indican que el crecimiento vegetativo podría ser específico de cada cultivo (Sarrou *et al.*, 2019). Dosis de 13 a 129 µg L⁻¹ de KI no afectaron la biomasa en lechuga (Voogt *et al.*, 2010), mientras que la dosis de 60 µM de KI redujo 22 % la biomasa aérea con respecto al testigo también en lechuga (Blasco *et al.*, 2008). Con dosis de 10 µM de yodo en *Arabidopsis* se aumentó en 22 % la biomasa, los efectos positivos del yodo sobre el crecimiento se perdieron a 30 µM, lo que sugiere que esta concentración de I⁻ puede estar por encima del umbral de toxicidad (Kiferle *et al.*, 2021).

Las dosis de KI aplicadas a las plantas generaron un aumento en el área foliar de la berenjena, la dosis de 90 µM produjo un aumento de 16 % en comparación con 30 µM y

ésta generó un aumento del 15 % mayor que el tratamiento sin aplicación de KI, la respuesta de las plantas a la dosis de 60 μM fue igual a las demás dosis aplicadas con KI (Cuadro 1). En albahaca (*Ocimum basilicum*) el área foliar no se afectó con dosis de 10 μM de KI y en lechuga el área foliar disminuyó 20 a 59 % con respecto al testigo (Puccinelli *et al.*, 2021).

Algunas variables foliares no mostraron efecto significativo entre tratamientos en las plantas de berenjena (Cuadro 1); sin embargo, con las dosis de KI se mostraron síntomas de fitotoxicidad, como clorosis foliar y quemaduras de hojas inferiores, que posteriormente se desprendían conforme se aumentaba la concentración de yodo. Estos efectos coinciden con los reportados en tomate por Landini *et al.* (2011). El efecto negativo del yodo en las plantas se debe a su acumulación de forma continua y creciente en los tejidos de las hojas más viejas, provocando necrosis, principalmente de los márgenes exteriores (Signore *et al.*, 2018); la severidad de los síntomas aumenta con el tiempo, con caída de hojas inferiores, lo que depende de la concentración del yodo aplicado (Incrocci *et al.*, 2019). Aun así, el área foliar se incrementó en la parte media y alta de las plantas de berenjena por las dosis de KI.

Con las dosis de KI aplicadas a las plantas no se encontraron diferencias estadísticas significativas en el rendimiento (Cuadro 1). En frutos de tomate no se observaron efectos en el rendimiento con dosis de 7.88 μM de KI y KIO_3 respecto al testigo (Smoleń *et al.*, 2015). La aplicación de yodo en 5, 10 y 20 mM en la etapa reproductiva del tomate no afectó el crecimiento, desarrollo vegetativo ni reproductivo (Landini *et al.*, 2011). En lechuga no se encontraron diferencias en el peso con dosis de 10 μM de

KIO_3 en comparación con el testigo sin aplicación de yodo (Smoleń *et al.*, 2022).

Firmeza, sólidos solubles totales y acidez titulable

La aplicación de KI en las plantas de berenjena aumentó la firmeza de los frutos hasta en 12 % comparado con el testigo (Figura 1 A). En frutos de tomate la aplicación de 5 mL L^{-1} de yodo presentó 70 % mayor firmeza con respecto al testigo, lo cual es deseable para incrementar la vida de anaquel del fruto (Martínez-Damián *et al.*, 2019).

Las dosis de 0 y 90 μM de KI aplicadas a las plantas de berenjena fueron iguales estadísticamente en el contenido de sólidos solubles totales; sin embargo, la aplicación de la dosis de 30 μM disminuyó en 27 % los SST comparado con el testigo (0 μM). Las dosis de 30 y 60 μM aplicadas, comparadas con la dosis 90 μM redujeron en 26 % los SST (Figura 1 B). En frutos de tomate no se observó efecto en °Brix con dosis de 7.88 μM de KI con respecto al testigo; por otro lado, con dosis de 7.88 μM KIO_3 los SST disminuyeron en 27 % (Smoleń *et al.*, 2015). En tomate, las dosis de KI y KIO_3 aplicadas a las plantas redujeron el contenido de azúcares, al disminuir °Brix progresivamente con el aumento de las dosis, de 1 a 5 mM de KI con disminución de 13 a 26 % y con dosis de 0.5 a 2 mM de KIO_3 de 13 a 20 % (Kiferle *et al.*, 2013). En frutos de pimiento las dosis de 0.25 y 0.50 mg L^{-1} KI aumentaron en 28 % el contenido de sólidos solubles con respecto al testigo. La cantidad correcta de yodo mejora la calidad de los frutos, incrementa los sólidos solubles y reduce la acidez (Li *et al.*, 2017).

Con las dosis de KI no se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en la acidez titulable de los frutos de berenjena (Figura 1C). En frutos de tomate se

Cuadro 1. Crecimiento de las plantas y frutos de berenjena bajo diferentes dosis de KI.

| Dosis de KI (μM) | Altura (cm) | Área foliar (cm^2) | Núm. de hojas | Biomasa seca aérea (g) | Rendimiento (g/planta) |
|-------------------------------|-------------|-------------------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 80.09 a | 306.10 c | 61.00 a | 114.45 a | 27.86 a |
| 30 | 77.48 a | 360.12 b | 57.80 a | 117.22 a | 27.30 a |
| 60 | 80.93 a | 399.92 ab | 61.80 a | 96.70 a | 27.23 a |
| 90 | 81.39 a | 429.53 a | 61.00 a | 110.57 a | 27.04 a |
| DSH (0.05) | 14.48 | 50.5 | 4.37 | 25.18 | 8.02 |
| CV (%) | 10.01 | 6.43 | 4.00 | 10.93 | 30.78 |

Medias con letras iguales en las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$). *: significancia estadística con $P \leq 0.05$, **: significancia estadística con $P \leq 0.01$, ns: no significativo, CV: coeficiente de variación, DSH: diferencia significativa honesta.

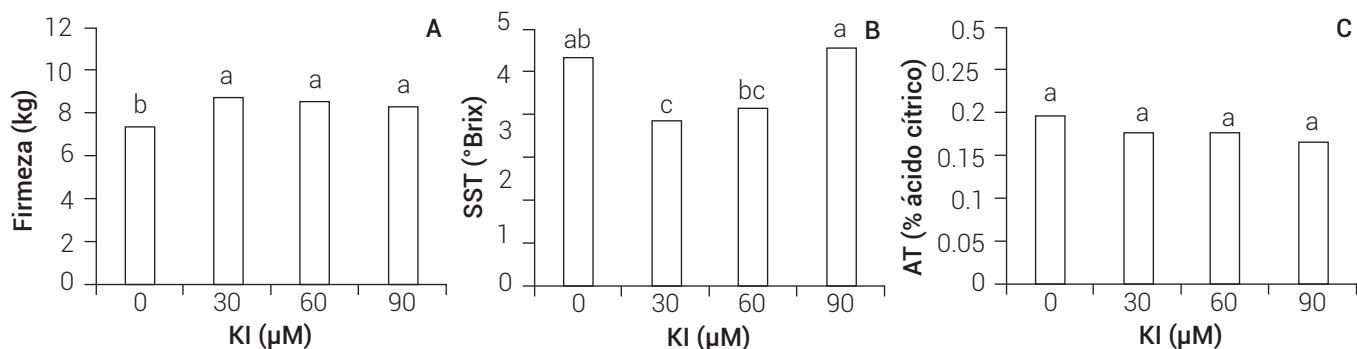


Figura 1. Efecto de dosis de KI en: A) firmeza, B) sólidos solubles totales y C) acidez titulable en frutos de berenjena. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

observó una disminución de 10 % en acidez titulable con dosis de $7.88 \mu\text{M}$ de KI y de 5 % con KIO_3 con respecto al testigo (Smoleń *et al.*, 2015). En frutos de pimiento la acidez titulable con la aplicación de 0.50 mg L^{-1} de KI aumentó en 18 %, y con la dosis de 1.0 mg L^{-1} disminuyó en 28 % con respecto al testigo, lo que demuestra que la aplicación de yodo restringe la síntesis de ácidos orgánicos (Li *et al.*, 2017).

Vitamina C, flavonoides totales, fenoles totales y actividad antioxidante

Con las dosis de KI aplicadas a las plantas no se mostraron diferencias estadísticas significativas en la concentración de vitamina C (ácido ascórbico) en los frutos de berenjena (Figura 2A). En frutos de pimiento Li *et al.* (2017) observaron que a medida que la concentración de yodo aumentó, el contenido de ácido ascórbico en frutos fue similar al testigo; sin embargo, con dosis de 0.50 y 1.00 mg L^{-1} de KI el contenido de ácido ascórbico aumentó en 23 y 32 % respectivamente; de igual manera, Smoleń *et al.* (2015) observaron un aumento de 10 % en la concentración de ácido ascórbico en frutos de tomate, con dosis aplicadas de $7.88 \mu\text{M}$ de KI y de KIO_3 respecto al testigo. En lechuga, dosis de $10 \mu\text{M}$ de KIO_3 no generaron diferencias en vitamina C en las hojas en comparación con el testigo sin aplicación de yodo (Smoleń *et al.*, 2022).

Con las dosis de KI aplicadas a las plantas no se detectaron diferencias estadísticas significativas en los flavonoides totales de los frutos de berenjena (Figura 2 B). En plantas de tomate, una dosis de $7.88 \mu\text{M}$ de KI no influyó en los flavonoides en los frutos (Smolén *et al.*, 2015). En lechuga los flavonoides aumentaron de 67 a 90 % con dosis de 10 a $80 \mu\text{M}$ de KI con respecto al testigo (Blasco *et al.*, 2008).

La dosis de $90 \mu\text{M}$ de KI aplicada en las plantas de

berenjena disminuyó en 45 % los fenoles totales en los frutos en comparación con las demás dosis (Figura 2 C). Se observó un aumento en frutos de tomate de 6 % en los compuestos fenólicos con dosis de $7.88 \mu\text{M}$ de KI y de KIO_3 con respecto al testigo (Smoleń *et al.*, 2015). En albahaca agregar KI en dosis de $10 \mu\text{M}$ aumentó el contenido de fenoles en 11 % en comparación con el testigo (Puccinelli *et al.*, 2021). Los compuestos fenólicos previenen formación enzimática y no enzimática de especies reactivas de oxígeno (Blasco *et al.*, 2008). En el presente estudio, la dosis alta de KI aplicada al cultivo de berenjena mostró que disminuye el contenido fenólico en los frutos, por lo que las dosis bajas aplicadas a las plantas, llevarían a producir en menor medida especies reactivas de oxígeno.

La aplicación de dosis 60 y $90 \mu\text{M}$ de KI en el cultivo de berenjena aumentó en 34 % la actividad antioxidante en los frutos en comparación con la dosis 0 y $30 \mu\text{M}$ (Figura 2 D). En frutos de tomate la dosis de 5 mM de KI aumentó la actividad antioxidante en 42 % con respecto al testigo, en dosis más bajas no se detectaron diferencias, lo que indica que en los frutos el yodo por encima de un cierto umbral podría desencadenarse una respuesta antioxidante contra el estrés causado por este ion (Kiferle *et al.*, 2013). En plantas de tomate, la dosis de $7.88 \mu\text{M}$ de KI no influyó en la actividad antioxidante de los frutos (Smolén *et al.*, 2015), mientras que en lechuga la capacidad antioxidante fue mayor con dosis de $10 \mu\text{M}$ KI de 8 a 13 % con relación al testigo (Puccinelli *et al.*, 2021). En este caso, al usar dosis altas de KI en el cultivo de berenjena se incrementa la actividad antioxidante en los frutos, el agregar esta hortaliza a la dieta podría contribuir a prevenir enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo, entre ellas cáncer y Alzheimer (Rajendran *et al.*, 2014).

Contenido de minerales Mg, Fe, Zn y Mn en los frutos

La aplicación de $90 \mu\text{M}$ de KI a las plantas aumentó en

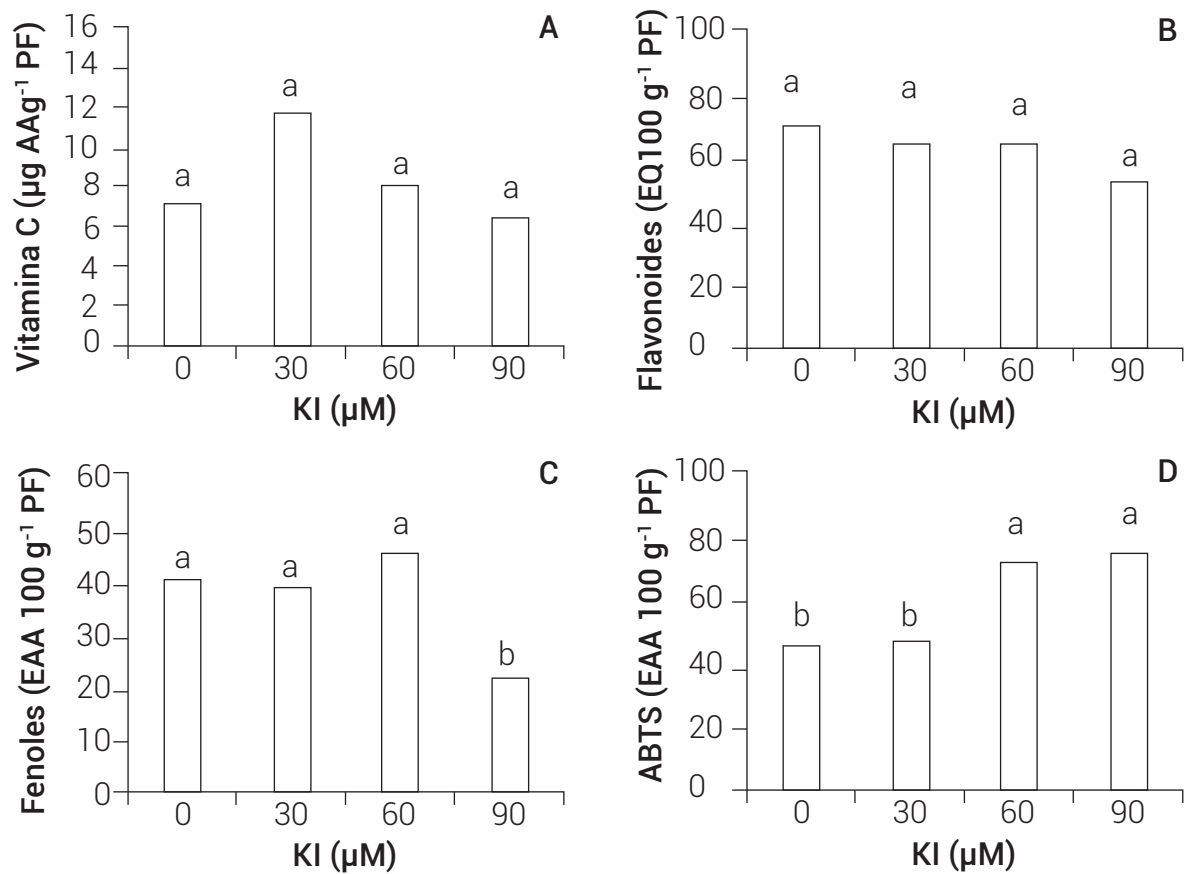


Figura 2. Efecto de dosis de KI en: A) vitamina C, B) flavonoides, C) fenoles y D) actividad antioxidante en frutos de berenjena. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

Cuadro 2. Contenido de minerales en frutos de berenjena con diferentes dosis de KI.

| Dosis de KI(μM) | Magnesio | Hierro | Zinc | Manganeso |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | (mg kg^{-1}) | (mg kg^{-1}) | (mg kg^{-1}) | (mg kg^{-1}) |
| 0 | 11323.3 ab | 28.98 a | 0.33 b | 19.55 bc |
| 30 | 10926.3 b | 31.01 a | 0.31 b | 18.79 c |
| 60 | 11870.4 ab | 31.33 a | 0.37 ab | 24.74 ab |
| 90 | 12957.5 a | 35.02 a | 0.44 a | 29.76 a |
| DSH (0.05) | 1643.9 | 7.07 | 0.08 | 5.35 |
| CV (%) | 8.64 | 13.86 | 14.99 | 14.26 |

Medias con letras iguales en las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$). *: significancia estadística con $P \leq 0.05$, **: significancia estadística con $P \leq 0.01$, ns: no significativo, CV: coeficiente de variación, DSH: diferencia significativa honesta.

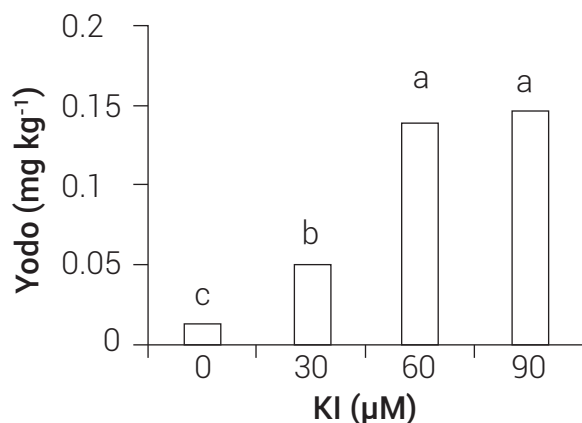


Figura 3. Concentración de yodo en frutos de berenjena con aplicación de KI. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

16 % el contenido de Mg en los frutos de berenjena (Cuadro 2), mientras que el resto de las dosis fueron iguales estadísticamente. Dosis de 0.5 mg L^{-1} de KI aplicadas en plantas de tomate aumentó las concentraciones de Mg entre 11 y 21 % en los frutos, según el tipo de suelo (Dobosy *et al.*, 2020b). Con la aplicación de yodo en dosis de 0.5 mg L^{-1} en plantas de papa, las concentraciones de Mg disminuyeron de 73 a 78 % en los tubérculos, y en zanahoria disminuyó 34 % (Dobosy *et al.*, 2020a).

En la concentración de Fe en los frutos, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las dosis de KI aplicadas a las plantas (Cuadro 2). En plantas de tomate, con dosis de 0.1 mg L^{-1} de yodo disminuye el contenido de Fe de 25 a 58 % en los frutos y con 0.5 mg L^{-1} de yodo la disminución de Fe es entre 60 y 63 %. En el cultivo de repollo (*Brassica oleracea* var. *capitata*) disminuyó de 4 a 22 % la concentración de Fe en las hojas con dosis de 0.5 mg L^{-1} y con dosis bajas de 0.1 mg L^{-1} aumentó en 21 y 26 % (Dobosy *et al.*, 2020b). La fertilización con altas tasas de aplicación de yodo mejora el estado nutricional de Fe, especialmente cuando se aplica como IO_3^- más que como I^- , estos iones pueden entrar en sinergismo que favorece la absorción y acumulación de ambos iones en la lechuga (Blasco *et al.*, 2012).

La concentración de Zn en los frutos de berenjena (Cuadro 2) aumentó en 25 % con dosis de 90 μM de KI aplicadas, en comparación con las dosis 0 y 30 μM de KI. En plantas de tomate, dosis de 0.5 mg L^{-1} de KI aumentó de 25 a 39 % la concentración de Zn en los frutos, según el tipo de suelo (Dobosy *et al.*, 2020b). Con la aplicación de yodo a 0.5 mg L^{-1} en plantas de papa no se obtuvieron diferencias en las concentraciones de Zn en los tubérculos, y en zanahoria disminuyó en 46 % (Dobosy *et al.*, 2020a). En lechuga, dosis de 20, 40 y 80 μM de I^- y IO_3^- no modificaron

la concentración de Zn en las hojas (Blasco *et al.*, 2012).

La concentración de Mn en los frutos aumentó en 34 % con la aplicación de 90 μM de KI a las plantas comparado con el testigo (Cuadro 2). Con la dosis de 60 μM se obtuvo 26 % mayor concentración de Mn en los frutos con respecto a la dosis 30 μM de KI; sin embargo, la dosis de 60 μM de KI no mostró diferencias con las de 0 y 90 μM de KI aplicadas a las plantas. En plantas de tomate con dosis de 0.1 mg L^{-1} disminuyó entre 11 y 22 % la concentración de Mn en los frutos y con 0.5 mg L^{-1} no hubo diferencias (Dobosy *et al.*, 2020b). En tubérculos de papa el contenido de Mn aumentó en 20 % con dosis de 0.5 mg L^{-1} aplicadas a las plantas y en zanahoria éste aumentó de 30 a 33 % con dosis de 0.5 mg L^{-1} de KI (Dobosy *et al.*, 2020a). En lechuga, dosis de 20, 40 y 80 μM de I^- y IO_3^- no modificaron la concentración de Mn en las hojas (Blasco *et al.*, 2012).

Contenido de yodo en los frutos

La concentración de I^- en los frutos de berenjena aumentó en 90 % con las dosis 60 y 90 μM aplicadas a las plantas y en 64 % con la de 30 μM de KI en comparación con el testigo (Figura 3). En los estudios realizados con aplicaciones de yodo existe una tendencia a aumentar la concentración de este ion en los diferentes cultivos y varía dependiendo de la dosis y la forma química. En plantas de tomate la concentración de yodo en los frutos aumentó de 96 a 99 % con dosis de 1 a 5 mM de KI y con dosis de 0.5 a 2 mM de KIO_3 de 88 a 95 % (Kiferle *et al.*, 2013), con dosis de 5 a 20 mM de KI de 84 a 93 % (Landini *et al.*, 2011) y con dosis de 7.88 μM de KI y de KIO_3 de 85 a 75 % (Smoleń *et al.*, 2015). En frutos de pimiento la concentración de yodo aumentó 83 % con dosis aplicadas de 0.25 a 0.50 mg L^{-1} (Li *et al.*, 2017), mientras que en lechuga dosis de 10 μM de KI aumentó la concentración de yodo en las hojas de 5 a 7

veces (Puccinelli *et al.*, 2021), y con dosis de 10 a 120 μM de KI de 97 a 99 %, de 10 a 80 μM de KIO_3 en 98 % (Blasco *et al.*, 2008), con dosis desde 13 a 129 $\mu\text{g L}^{-1}$ de KI en 33 % (Voogt *et al.*, 2010) y con dosis de 10 μM de KIO_3 aumentó en 75 % (Smoleń *et al.*, 2022). El utilizar yodo como biofortificador en el cultivo de berenjena mejora la calidad nutricional, debido a que aumenta su concentración en los frutos, el consumo de este elemento en la dieta es de importancia debido a su participación en las hormonas tiroideas y en la disminución de trastornos por deficiencias de yodo en la población humana.

CONCLUSIONES

Las dosis de yoduro de potasio utilizadas en las plantas de berenjena aumentan el contenido de yodo en los frutos, el usar 60 y 90 μM aumenta la actividad antioxidante y la concentración de minerales, sin afectar el crecimiento y rendimiento del cultivo. El utilizar yodo como biofortificador en el cultivo de berenjena mejora la calidad nutricional, debido a que aumenta la concentración de yodo en los frutos, la actividad antioxidante, la concentración de minerales como Zn y Mn, sin afectar la concentración de Fe y compuestos bioactivos como vitamina C y flavonoides.

BIBLIOGRAFÍA

- AOAC, Association of Official Analytical Chemists (1990) Official Methods and Analysis. K. Helrich (ed.). Association of Official Analytical Chemists. Arlington, Virginia, USA. 1298 p.
- Arvouet-Grand A., B. Vennat, A. Pourrat and P. Legret (1994) Standardisation d'un extrait de propolis et identification des principaus constituants. *Journal de Pharmacie de Belgique* 49:462-468.
- Bana R. S., G. S. Jat, M. Grover, S. D. Bambariya, D. Singh, R. Bansal, ... and T. Singh (2022) Foliar nutrient supplementation with micronutrient-embedded fertilizer increases biofortification, soil biological activity and productivity of eggplant. *Scientific Reports* 12:5146, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09247-0>
- Blasco B., J. J. Ríos, L. M. Cervilla, E. SánchezRodríguez, J. M. Ruiz and L. Romero (2008) Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: potential benefits for cultivation and human health. *Annals of Applied Biology* 152:289-299, <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2008.00217.x>
- Blasco B., J. J. Ríos, E. Sánchez-Rodríguez, M. M. Rubio-Wilhelmi, R. Leyva, L. Romero and J. M. Ruiz (2012) Study of the interactions between iodine and mineral nutrients in lettuce plants. *Journal of Plant Nutrition* 35:1958-1969, <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.716889>
- Carvalho S. M. P. and M. W. Vasconcelos (2013) Producing more with less: strategies and novel technologies for plant-based food biofortification. *Food Research International* 54:961-971, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.021>
- Dávila-Rangel I. E., P. Leija-Martínez, J. Medrano-Macias, L. O. Fuentes-Lara, S. González-Morales, A. Juárez-Maldonado and A. Benavides-Mendoza (2019) Iodine biofortification of crops. In: Nutritional Quality Improvement in Plants. Concepts and Strategies in Plant Sciences. P. K. Jaiwal, A. K. Chhillar, D. Chaudhary and R. Jaiwal (eds.). Springer. Cham, Switzerland. pp:79-113, https://doi.org/10.1007/978-3-319-95354-0_4
- Dobosy P., A. Endrédi, S. Sandil, V. Vetési, M. Rékási, T. Takács and G. Záray (2020a) Biofortification of potato and carrot with iodine by applying different soils and irrigation with iodine-containing water. *Frontiers in Plant Science* 11:593047, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.593047>
- Dobosy P., V. Vetési, S. Sandil, A. Endrédi, K. Kröpfl, M. Óvári, ... and G. Záray (2020b) Effect of irrigation water containing iodine on plant physiological processes and elemental concentrations of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata L.) and tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivated in different soils. *Agronomy* 10:720, <https://doi.org/10.3390/agronomy10050720>
- Gürbüz N., S. Uluişik, A. Frary, A. Frary and S. Doğanlar (2018) Health benefits and bioactive compounds of eggplant. *Food Chemistry* 268:602-610, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.093>
- Incrocci L., G. Carmassi, R. Maggini, C. Poli, D. Saidov, C. Tamburini, ... and A. Pardossi (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>
- Jagota S. K. and H. M. Dani (1982) A new colorimetric technique for the estimation of vitamin C using folin phenol reagent. *Analytical Biochemistry* 127:178-182, [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(82\)90162-2](https://doi.org/10.1016/0003-2697(82)90162-2)
- Kiferle C., S. Gonzali, H. T. Holwerda, R. R. Ibaceta and P. Perata (2013) Tomato fruits: a good target for iodine biofortification. *Frontiers in Plant Science* 4:205, <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00205>
- Kiferle C., M. Martinelli, A. M. Salzano, S. Gonzali, S. Beltrami, P. A. Salvadori, ... and P. Perata (2021) Evidences for a nutritional role of iodine in plants. *Frontiers in Plant Science* 12:616868, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
- Landini M., S. Gonzali and P. Perata (2011) Iodine biofortification in tomato. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174:480-486, <https://doi.org/10.1002/jpln.201000395>
- Lara-Izaguirre A. Y., A. N. Rojas-Velázquez, I. Alía-Tejagal and J. A. Alcalá-Jáuregui (2022) Sodium chloride on bioactive compounds of eggplant (*Solanum melongena* L.) grown in hydroponics under two protected structures. *Agrociencia* 56:207-232, <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2732>
- Li R., D. W. Li, H. P. Liu, C. L. Hong, M. Y. Song, Z. X. Dai, ... and H. X. Weng (2017) Enhancing iodine content and fruit quality of pepper (*Capsicum annuum* L.) through biofortification. *Scientia Horticulturae* 214:165-173, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.030>
- Martínez-Damián M. T., R. Cano-Hernández, E. C. Moreno-Pérez, F. Sánchez-del Castillo and O. Cruz-Alvarez (2019) Effect of preharvest growth bioregulators on physicochemical quality of saladette tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 25:29-43, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.06.013>
- Puccinelli M., M. Landi, R. Maggini, A. Pardossi and L. Incrocci (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>
- Rajendran P., N. Nandakumar, T. Rengarajan, R. Palaniswami, E. N. Gnanadhas, U. Lakshminarasiah, ... and I. Nishigaki (2014) Antioxidants and human diseases. *Clinica Chimica Acta* 436:332-347, <https://doi.org/10.1016/j.cca.2014.06.004>
- Re R., N. Pellegrini, A. Progettente, A. Pannala, M. Yang and C. Rice-Evans (1999) Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine* 26:1231-1337, [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Sarrou E., A. S. Siomos, S. Riccadona, D. C. Aktsoglou, P. Tsouvaltzi, A. Angeli, ... and S. Martens (2019) Improvement of sea fennel (*Crithmum maritimum* L.) nutritional value through iodine biofortification in a hydroponic floating system. *Food Chemistry* 296:150-159, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.190>
- SAS Institute (2002) Statistical Analysis System version 9.0. Windows. SAS Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Signore A., M. Renna, M. D'Imperio, F. Serio and P. Santamaria (2018) Preliminary evidences of biofortification with iodine of "Carota di Polignano", an Italian carrot landrace. *Frontiers in Plant Science* 9:170, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00170>
- Smoleń S., J. Wierzińska, W. Sady, A. Kołton, A. Wiszniewska and M. Liszka-Skoczylas (2015) Iodine biofortification with additional application of salicylic acid affects yield and selected parameters of chemical composition of tomato fruits (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 188:89-96, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.023>
- Smoleń S., I. Ledwozyw-Smoleń, M. Halka, W. Sady and P. Kováčik (2017) The

absorption of iodine from 5-iodosalicylic acid by hydroponically grown lettuce. *Scientia Horticulturae* 225:716-725, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.009>

Smoleń S., I. Kowalska, Ł. Skoczylas, M. Tabaszewska, J. Pitala, J. Mrożek and P. Kováčik (2022) Effectiveness of enriching lettuce with iodine using 5-iodosalicylic and 3,5-diiodosalicylic acids and the chemical composition of plants depending on the type of soil in a pot experiment. *Food Chemistry* 382:132347, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132347>

Steiner A. A. (1984) The universal nutrient solution. Sixth International Congress on Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands.

pp:633-650.

Voogt W., H. T. Holwerda and R. Khodabaks (2010) Biofortification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with iodine: the effect of iodine form and concentration in the nutrient solution on growth, development and iodine uptake of lettuce grown in water culture. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 90:906-913, <https://doi.org/10.1002/jsfa.3902>

Waterman P. G. and S. Mole (1994) Analysis of Phenolic Plant Metabolites (Ecological Methods and Concepts). Wiley-Blackwell. New York, USA. 248 p.