



EFECTO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA CALIDAD NUTRACÉUTICA DE BERENJENA (*Solanum melongena* L.) EN HIDROPONÍA by Ana Yesenia Lara Izaguirre is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUÍS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE
POSGRADO



EFFECTO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA CALIDAD NUTRACÉUTICA DE
BERENJENA (*Solanum melongena* L.) EN HIDROPONÍA

Por:

Ana Yesenia Lara Izaguirre

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de
Doctora en Ciencias Agropecuarias

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

Noviembre 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUÍS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE
POSGRADO



EFFECTO DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA CALIDAD NUTRACÉUTICA DE
BERENJENA (*Solanum melongena* L.) EN HIDROPONÍA

Por:

Ana Yesenia Lara Izaguirre

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de
Doctora en Ciencias Agropecuarias

COMITÉ

Director: Dr. Ángel Natanael Rojas Velázquez

Asesor: Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui

Asesor Externo: Dr. Irán Alia Tejacal

Asesor: Dr. Heriberto Méndez Cortés

El trabajo titulado "**Efecto de la solución nutritiva en la calidad nutracéutica de berenjena (*Solanum melongena* L.) en hidroponía**" fue realizado por: Ana Yesenia Lara Izaguirre como requisito parcial para obtener el título de "Doctora en Ciencias Agropecuarias" y fue revisado y aprobado por el suscrito Comité de Tesis.

Dr. Ángel Natanael Rojas Velázquez

Director

Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui

Asesor

Dr. Irán Alia Tejacal

Asesor Externo

Dr. Heriberto Méndez Cortés

Asesor

Ejido Palma de la Cruz, Municipio de Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P. a los 25 días del mes de noviembre de 2022.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por permitirme realizar y culminar mis estudios de posgrado, por darme la sabiduría, el entendimiento y la comprensión para cumplir con mis objetivos personales y profesionales.

Además, lo dedico a mi familia, mis papás, mi hermano y mi tío, por el apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para mis estudios de posgrado.

A la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí, por la oportunidad de estudiar este posgrado en sus instalaciones.

A mi comité de tesis, Dr. Ángel Natanael Rojas Velázquez, Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui, Dr. Irán Alia Tejacal y Dr. Heriberto Méndez Cortés. A cada uno de ellos por el gran apoyo para la realización de este trabajo.

Al Dr. Irán Alia Tejacal que me apoyó como asesor externo, gracias por su amable recibimiento en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Además, a M.C. Alyn Mariana Palacios Sosa, Dr. Emilio Álvarez, Dr. Benito Terán, M.C. Jazmín Selene Salazar Díaz, M.B. Lizette Suastegui Baylon, I.H. Luis Antonio Martínez Flores, por apoyarme con las metodologías de laboratorio y recibirme estos años en el Laboratorio de Producción Agrícola de la misma facultad.

Al Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui y la Dra. Alejandra Hernández Montoya por el apoyo en el laboratorio de Ingeniería Ambiental para la realización de los análisis químicos de esta investigación.

Y en especial al Dr. Ángel Natanael, por confiar en mí desde la tesis de Licenciatura y Maestría, además de darme la oportunidad y el apoyo necesario para realizar este trabajo de Doctorado.

CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE CUADROS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xv
SUMMARY	xvi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Hipótesis	5
Objetivo General	5
Objetivos específicos.....	5
LITERATURA CITADA	7
CAPÍTULO II	11
SODIUM CHLORIDE ON BIOACTIVE COMPOUNDS OF EGGPLANT (<i>Solanum melongena</i> L.) GROWN IN HYDROPONICS UNDER TWO PROTECTED STRUCTURES	11
SUMMARY	12
INTRODUCTION	13
MATERIALS AND METHODS	15
Plant Material and Growing Conditions	15
Treatment Design and Experimental Design.....	15

Determination of Weight at Harvest, Firmness and Sodium Concentration in Fruits	16
Determination of Bioactive Compounds in Fruits.....	16
Total Soluble Solids (TSS) and Titratable Acidity (TA).....	16
Vitamin C.....	16
Phenols.....	17
Flavonoids.....	17
Antioxidant Activity	17
Statistic Analysis.....	18
RESULTS AND DISCUSSION	19
Fruit Weight.....	19
Firmness.....	20
Total Soluble Solids.....	20
Titratable Acidity.....	21
Sodium in Fruits.....	21
Flavonoids.....	22
Phenols.....	23
Vitamin C.....	24
Antioxidant Activity	25
Principal Component Analysis	26
CONCLUSIONS	28
LITERATURE CITED.....	29
CAPÍTULO III.....	33
CULTIVO DE BERENJENA (<i>Solanum melongena</i> L.) EN HIDROPONÍA BAJO INVERNADERO Y MALLA SOMBRA	33
RESUMEN	34

ABSTRACT	35
INTRODUCCIÓN.....	36
MATERIALES Y MÉTODOS	39
Sitio Experimental y Material Vegetal	39
Tratamientos	39
Variables Evaluadas a la Cosecha	40
Diseño Experimental.....	40
Análisis Estadístico.....	40
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
Biomasa Seca.....	42
Área Foliar	42
Rendimiento.....	43
SPAD	44
NDVI	45
NO ₃ ⁻ en Pecíolo	46
K ⁺ en Pecíolo	47
Ca ²⁺ en Pecíolo	48
Na ⁺ en Pecíolo	49
CONCLUSIONES.....	52
LITERATURA CITADA.....	53
CAPÍTULO IV	57
BIOFORTIFICACIÓN CON YODO, ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE Y MINERALES EN FRUTOS DE BERENJENA (<i>Solanum melongena</i> L.)	57
RESUMEN	58
SUMMARY	59

INTRODUCCIÓN.....	60
MATERIALES Y MÉTODOS	62
Sitio experimental	62
Material genético y manejo del experimento.....	62
Diseño y unidad experimental	62
Tratamientos	62
Altura, área foliar, número de hojas, peso seco y rendimiento.....	63
Análisis de los frutos.....	63
Vitamina C.....	63
Flavonoides totales	64
Preparación de extractos para fenoles totales y actividad antioxidante.....	64
Fenoles totales.....	64
Actividad antioxidante ABTS.....	64
Minerales en los frutos.....	64
Análisis Estadístico.....	65
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
Altura, Área Foliar, Número de Hojas, Biomasa Seca Aérea y Rendimiento	66
Firmeza, Sólidos Solubles Totales y Acidez Titulable	67
Vitamina C, Flavonoides Totales, Fenoles Totales y Actividad Antioxidante.....	68
Contenido de Minerales Mg, Fe, Zn y Mn en los Frutos.....	70
Contenido de Yodo en los Frutos	72
CONCLUSIONES.....	73
LITERATURA CITADA	74
CAPÍTULO V.....	77

SELENIUM EFFECT ON PLANT GROWTH AND NUTRACEUTICAL QUALITY OF EGGPLANT FRUITS (<i>Solanum melongena</i> L.).....	77
RESUMEN	78
SUMMARY	79
INTRODUCCIÓN.....	80
MATERIALES Y MÉTODOS	82
Sitio del Experimento	82
Condiciones de Crecimiento.....	82
Diseño y Unidad Experimental.....	82
Tratamientos	82
Altura, número de hojas, área foliar y peso seco aéreo	83
Rendimiento y características físicas del fruto	83
Análisis de frutos	83
Sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT) e índice de sabor (IS).....	83
Antocianinas	84
Vitamina C.....	84
Flavonoides.....	84
Preparación de extractos para fenoles y actividad antioxidante	84
Fenoles.....	85
Actividad antioxidante.....	85
Análisis estadístico	85
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	86
Crecimiento de las Plantas de Berenjena.....	86
Características de Frutos de Berenjena.....	87
Características Organolépticas en Frutos de Berenjena.....	89

Calidad Nutracéutica de Frutos de Berenjena.....	90
Actividad Antioxidante en Frutos de Berenjena.....	92
CONCLUSIONES.....	94
LITERATURA CITADA.....	95
CAPÍTULO VI.....	98
CONCLUSIONES GENERALES.....	98

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO II

Cuadro		Página
1	Quality of eggplant fruits grown under two types of protected structures and different doses of NaCl.....	19
2	Concentration of flavonoids and total phenols in eggplant fruits grown under two types of protected structures and different doses of NaCl.....	22

CAPÍTULO III

Cuadro		Página
1	Crecimiento de plantas de berenjena bajo dos estructuras protegidas y dosis de NaCl.....	45

CAPÍTULO IV

Cuadro		Página
1	Crecimiento de las plantas y frutos de berenjena bajo dosis de KI.....	67
2	Contenido de minerales en frutos de berenjena con dosis de KI.....	71

CAPÍTULO V

Cuadro		Página
1	Crecimiento de las plantas de berenjena bajo dosis de Na ₂ SeO ₃	87
2	Características de frutos de berenjena bajo dosis de Na ₂ SeO ₃	88

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura		Página
1	Sodium concentration in eggplant fruits from plants in response to the interaction protected structure and NaCl dose.....	22
2	Vitamin C concentration and ABTS antioxidant activity in eggplant fruits from plants grown in response to protected structure and NaCl dosage...	25
3	Point distribution derived from principal component analysis of eggplant bioactive compounds in two protected structures and NaCl doses.....	27

CAPÍTULO III

Figura		Página
1	Iones NO_3^- y K^+ en extracto celular de peciolo en plantas de berenjena bajo estructuras protegidas (A, D), dosis de NaCl (B, E) e interacción estructura protegida y dosis de NaCl (C, F).....	48
2	Iones Ca^{2+} y Na^+ en extracto celular de peciolo en plantas de berenjena bajo estructuras protegidas (A, D), dosis de NaCl (B, E) e interacción estructura protegida y dosis de NaCl (C, F).....	51

CAPÍTULO IV

Figura		Página
1	Efecto de dosis de KI en A) Firmeza, B) Sólidos solubles totales y C) Acidez titulable en frutos de berenjena.	68
2	Efecto de dosis de KI en A) Vitamina C, B) Flavonoides, C) Fenoles y D) Actividad antioxidante en frutos de berenjena.....	70
3	Concentración de yodo en frutos de berenjena con aplicación de KI.....	72

CAPÍTULO V

Figura		Página
1	Frutos de berenjena bajo dosis de selenio A) 0 μM , B) 10 μM , C) 30 μM y D) 60 μM	89
2	Efecto de dosis de selenio en A) Sólidos solubles totales, B) Acidez titulable y C) Índice de sabor en frutos de berenjena.....	90
3	Efecto de dosis de selenio en A) Fenoles, B) Flavonoides, C) Vitamina C y D) Antocianinas en frutos de berenjena.....	92
4	Efecto de dosis de selenio en la actividad antioxidante en frutos de berenjena.....	93

RESUMEN

La berenjena es un cultivo de alto valor nutricional por sus propiedades nutraceuticas. El uso de iones benéficos en la solución nutritiva puede afectar el crecimiento de las plantas, la calidad organoléptica y nutraceutica de los productos cosechados. Evaluar el efecto del estrés salino con sodio, biofortificación con yodo y selenio en el crecimiento de las plantas, la calidad nutricional y nutraceutica de frutos de berenjena en hidroponía. Se realizaron tres experimentos en plantas de berenjena “Black beauty” con iones sodio (Na), yodo (I) y selenio (Se) en la solución nutritiva. En el primer experimento se aplicaron cuatro dosis de cloruro de sodio (NaCl) 0, 15, 30 y 45 mM en la solución nutritiva bajo dos estructuras protegidas invernadero y malla sombra. En el segundo experimento se utilizaron cuatro dosis de yoduro de potasio (KI) 0, 30, 60 y 90 μM en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero. En el tercer experimento se utilizaron cinco dosis de selenato de sodio (Na_2SeO_3) 0, 10, 30, 60 y 90 μM en la solución nutritiva bajo condiciones de invernadero. Las variables evaluadas en los frutos fueron de calidad nutraceutica como fenoles totales, flavonoides totales, concentración de vitamina C, antocianinas y actividad antioxidante, además concentración de minerales magnesio (Mg), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) y yodo (I). Las dosis que mostraron mayor calidad nutraceutica fueron 30 y 45 mM de NaCl, con el incremento de la concentración de compuestos bioactivos, como vitamina C y actividad antioxidante en los frutos de berenjena. La aplicación de dosis de KI aumentó la concentración de yodo en los frutos, además dosis de 60 y 90 μM aumentaron la actividad antioxidante y minerales Zn y Mn en los frutos, lo que aportó un mayor valor nutricional. El uso de dosis bajas 10 μM de Na_2SeO_3 aumentó la actividad antioxidante y vitamina C en los frutos de berenjena, mejorando la calidad nutraceutica.

Palabras clave: iones, cultivo hidropónico, calidad de frutos, antioxidantes, calidad nutricional.

SUMMARY

The eggplant is a crop of high nutritional value due to its nutraceutical properties. The use of beneficial ions in the nutrient solution can affect the growth of plants, the organoleptic and nutraceutical quality of the harvested products. Evaluate the effect of saline stress with sodium, biofortification with iodine and selenium on plant growth, nutritional and nutraceutical quality of eggplant fruits in hydroponics. Three experiments were carried out on "Black beauty" eggplant plants with sodium, iodine and selenium ions in the nutrient solution. In the first experiment, four doses of sodium chloride (NaCl) 0, 15, 30 and 45 mM will be applied in the nutrient solution under two greenhouse protected structures and shade mesh. In the second experiment, four doses of potassium iodide (KI) 0, 30, 60 and 90 μM were used in the nutrient solution under greenhouse conditions. In the third experiment, five doses of sodium selenate (Na_2SeO_3) 0, 10, 30, 60 and 90 μM were used in the nutrient solution under greenhouse conditions. The variables evaluated in the fruits were of nutraceutical quality such as total phenols, total flavonoids, concentration of vitamin C, anthocyanins and antioxidant activity, as well as concentration of minerals magnesium (Mg), iron (Fe), zinc (Zn), manganese (Mn) and iodine (I). The doses that showed the highest nutraceutical quality were 30 and 45 mM NaCl, with an increase in the concentration of bioactive compounds, such as vitamin C and antioxidant activity in the aubergine fruits. The application of doses of KI increased the concentration of iodine in the fruits, in addition doses of 60 and 90 μM increased the antioxidant activity and minerals Zn and Mn in the fruits, which provided a higher nutritional value. The use of low doses of 10 μM Na_2SeO_3 increased the antioxidant activity and vitamin C in the brinjal fruits, improving the nutraceutical quality.

Keywords: ions, hydroponic culture, fruit quality, antioxidants, nutritional quality.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

La agricultura puede desempeñar un papel importante en la mejora de la nutrición humana y la salud en los países en desarrollo (Olum *et al.*, 2018), puesto que los consumidores demandan productos con un alto contenido de compuestos que promueven la salud (Botella *et al.*, 2021). Las frutas y verduras proporcionan una variedad de nutrientes y compuestos bioactivos, entre estos compuestos se encuentran fenoles, flavonoides y carotenoides, antocianinas, entre otros (Walia *et al.*, 2019); además, se consideran fuentes importantes de antioxidantes en la dieta diaria (Rouphael *et al.*, 2018b).

La deficiencia de micronutrientes en la dieta y su impacto negativo en la salud está en incremento en las últimas décadas a nivel mundial (Schiavon *et al.*, 2020), éstas deficiencias resultantes del consumo de productos agrícolas con bajos valores nutricionales, han motivado a la búsqueda de soluciones más sostenibles y apropiadas para producir cultivos con mayor rendimiento y calidad nutricional (Dimkpa y Bindraban, 2016), por lo que es necesario desarrollar estrategias que permitan producir alimentos vegetales de manera eficiente, con mayor concentración de micronutrientes en las partes comestibles (Carvalho y Vasconcelos, 2013). En este sentido, los sistemas de producción agrícola deben desarrollarse para mejorar el acceso a alimentos más nutritivos, para contribuir a esto, un enfoque prometedor es promover la producción y el consumo de alimentos de origen vegetal biofortificados (Wiesner-Reinhold *et al.*, 2017). La biofortificación agronómica consiste en la aplicación de fertilizantes con micronutrientes al suelo o la aplicación foliar a los cultivos (De Valença *et al.*, 2017), para el enriquecimiento de los alimentos con micronutrientes esenciales, es una de las alternativas clave recomendadas para aumentar la disponibilidad de micronutrientes (Olum *et al.*, 2018).

La “Biofortificación” o “fortificación biológica” se refiere a cultivos alimentarios nutricionalmente mejorados con una mayor biodisponibilidad para la población humana que se desarrollan y cultivan con el uso de diferentes técnicas, se puede lograr a través de

tres enfoques principales: transgénico, convencional y agronómico, que involucran el uso de biotecnología, mejoramiento de cultivos y estrategias de fertilización (Garg *et al.*, 2018). La biofortificación agronómica, se puede lograr mediante la aplicación de fertilizantes ricos en micronutrientes a cultivos específicos de interés (Olum *et al.*, 2018), se considera un medio rentable y sostenible de suministrar micronutrientes como yodo (I), hierro (Fe), zinc (Zn), calcio (Ca), selenio (Se) y silicio (Si), mismos que están presentes en cantidades limitadas en muchos alimentos, por lo que una dieta monótona puede resultar fácilmente en deficiencia (Singh *et al.*, 2016).

El éxito de la biofortificación en los cultivos depende de varios factores, como la forma química a utilizar, forma de aplicación, dosis de fertilización y la especie de cultivo (Schiavon *et al.*, 2020), además de la disponibilidad de los nutrientes del suelo para la absorción de la planta, así como, la movilidad y la retranslocación al alimento cosechado (De Valença *et al.*, 2017). La fertilización micronutrientes puede contribuir a una mejor producción de cultivos y aumentos en las concentraciones de los mismos en granos y frutos (Cakmak and Kutman., 2018). En el desarrollo de cultivos biofortificados, es importante una comprensión del mecanismo de transporte de iones para aumentar las concentraciones de minerales en los tejidos comestibles de las plantas (Khush *et al.*, 2012). Cuando la oferta y la demanda de micronutrientes en las plantas están bien adaptadas, además, la salud de los cultivos mejora, se alivian las deficiencias de micronutrientes en el cultivo lo cual aumenta el crecimiento, la eficiencia de absorción de nutrientes y la resistencia contra plagas y enfermedades, lo que puede reducir la necesidad de utilizar insecticidas (Dimkpa y Bindraban, 2016). La aplicación de fertilizantes enriquecidos con micronutrientes tiene un impacto ambiental negativo mínimo (De Valença *et al.*, 2017), por otro lado, como posible efecto negativo, puede ocurrir que al aumentar la concentración algunos micronutrientes en las partes comestibles de los cultivos pueden provocar la acumulación de algunos metales nocivos en las plantas (Khush *et al.*, 2012).

Los micronutrientes siguen un camino desde el suelo al cultivo y de los alimentos cosechados al cuerpo humano, posteriormente, la disponibilidad de los nutrientes en alimentos preparados y el estado fisiológico del cuerpo humano, determinan la capacidad de absorber y asimilar los nutrientes de estos alimentos (De Valença *et al.*, 2017). La

biofortificación en los cultivos proporciona un medio viable para llegar a las poblaciones rurales con desnutrición, que pueden tener un acceso limitado a los alimentos y suplementos comerciales, además, el enfoque de biofortificación no solo reducirá el número de personas con desnutrición, sino que también las ayudará a mantener un mejor estado nutricional (Singh *et al.*, 2016).

Factores como el estrés biótico y abiótico pueden afectar la producción agrícola de múltiples maneras (David *et al.*, 2022). Algunos tipos de estrés abiótico que afectan la producción de cultivos son el déficit hídrico, la salinidad y las temperaturas extremas, (Botella *et al.*, 2021). Algunas prácticas modifican la calidad de los cultivos, como la aplicación de fertilizantes, la fecha de siembra, la eficiencia del riego y la madurez a la cosecha, además de factores ambientales, como la humedad del suelo, la temperatura y la radiación solar, las cuales estimulan la concentración de ciertos metabolitos (Zou *et al.*, 2016). La salinidad es un estrés abiótico que afecta a los cultivos a nivel mundial, en alrededor de 950 millones de hectáreas (David *et al.*, 2022), se considera que niveles moderados de salinidad pueden mejorar los atributos de sabor y el valor nutricional de los cultivos, aumentando así su valor agregado que puedan compensar las pérdidas en el rendimiento, siendo un enfoque prometedor para convertir el problema de la salinidad de los suelos en una oportunidad de obtener productos vegetales de mayor calidad y contenido de compuestos bioactivos (Rouphael *et al.*, 2018b).

El crecimiento de las plantas depende en gran medida de las condiciones climáticas (Adamczewska-Sowińska *et al.*, 2016), dentro de los factores abióticos la temperatura del aire y de la zona de las raíces es crucial para el desarrollo de las plantas en condiciones de invernadero (Rouphael *et al.*, 2018a), además, la luz es un factor importante que influye en la morfogénesis, los procesos bioquímicos y la biosíntesis de metabolitos primarios y secundarios (Ali *et al.*, 2014). Las condiciones óptimas de crecimiento que proporcionan los entornos de invernadero controlados resaltan la calidad de las hortalizas cosechadas, debido a los materiales de cubierta que están asociados con la calidad vegetal al modificar las condiciones de luz (Rouphael *et al.*, 2018a).

Los compuestos bioactivos de los alimentos son compuestos distintos de los necesarios para cubrir los requerimientos nutricionales básicos, que pueden cambiar el estado de

salud de los seres humanos (Guaadaoui *et al.*, 2014). Los compuestos bioactivos de origen vegetal se producen del metabolismo secundario de las plantas, principalmente tienen propiedades antioxidantes, además actúan en la actividad anticancerígena y antidiabética, la mejora de las enfermedades cardiovasculares y del cerebro, disminuye el colesterol en la sangre y regula la salud intestinal (Samtiya *et al.*, 2021). Los antioxidantes de origen vegetal son principalmente polifenoles, como estilbenos, antocianinas, flavonoides, lignanos y ácidos fenólicos, además de carotenoides como carotenos y xantofilas, vitaminas C y E, los cuales, poseen una amplia variedad de propiedades biológicas, como anti-envejecimiento, antiinflamatorias, anti-virales, anti-microbianas y anti-cancerígenas (Li *et al.*, 2016). Estos antioxidantes en frutas y verduras eliminan los radicales libres dañinos, por lo que tienen un efecto protector contra la oxidación, mejoran el valor nutricional y previenen el deterioro de los alimentos (Poljsak *et al.*, 2021), compuestos como los polifenoles y carotenoides, exhiben una amplia gama de efectos biológicos (Peng *et al.*, 2014). La actividad biológica de los fenoles incluye capacidad antioxidante, refuerzo inmunológico, antiinflamatorio, antimutagénico, protección contra enfermedades cardiovasculares, inhibición de la peroxidación lipídica y efectos anticancerígenos (Rashmi y Negi, 2020) y en las propiedades biológicas de los carotenoides se encuentran antioxidantes, antiinflamatorias y fotoprotectoras (Villa-Rivera y Ochoa-Alejo, 2020).

Teniendo en cuenta sus importantes efectos en la salud, la evaluación de la actividad antioxidante a partir de alimentos y plantas, está atrayendo gran atención en la ciencia de los alimentos y la nutrición (Xu *et al.*, 2017). Se ha informado que los metabolitos secundarios de las plantas tienen una potente actividad antiviral (Bhushan *et al.*, 2021), la ingesta dietética de algunos compuestos bioactivos alimentarios que regulan positivamente la expresión de ciertos receptores, puede desempeñar un papel esencial en el manejo de las enfermedades virales actuales (Lange y Nakamura, 2020).

La nutrición vegetal juega un papel esencial para mejorar el rendimiento y la calidad del cultivo de berenjena, donde los fertilizantes minerales actúan como fuente de los principales nutrientes para la planta y contribuyen a la mejora de la productividad (Ghazi, 2018). La berenjena es una planta de importancia agronómica, que se cultiva y consume en muchos países (Cericola *et al.*, 2014), en una amplia variedad de formas, tamaños y

colores, es un cultivo de alto rendimiento dentro de la familia de las solanáceas (Karimi *et al.*, 2021). En México la superficie sembrada de berenjena es de 1,782.30 ha, con rendimientos de 78.59 udm/ha, con un valor económico de 1,553,232.78 miles de pesos en el año agrícola 2021, bajo riego + temporal (SIAP, 2021). El interés por el cultivo de la berenjena está creciendo en todo el mundo debido a su alto valor nutricional (Karimi *et al.*, 2021), por su composición en fitoquímicos y nutraceuticos, en los cuales se encuentran los compuestos fenólicos, considerados como los compuestos antioxidantes más importantes (Lo Scalzo *et al.*, 2016). El efecto beneficioso de los antioxidantes radica en que inhiben o retrasan el proceso oxidativo y se han convertido en compuestos indispensables en el ámbito de la nutrición humana (Rajendran *et al.*, 2014), por lo que el estudio de los antioxidantes naturales, como los de frutas y verduras, es de gran importancia para la salud (Zou *et al.*, 2016). Por lo anterior, se planteó la siguiente hipótesis y objetivos.

Hipótesis

La calidad nutraceutica de los frutos de berenjena se modifica con la aplicación de iones benéficos como sodio, yodo y selenio en la solución nutritiva.

Objetivo General

Evaluar el efecto del estrés salino con sodio, biofortificación con yodo y selenio en el crecimiento de las plantas, la calidad nutricional y nutraceutica de frutos de berenjena en hidroponía.

Objetivos específicos:

1. Evaluar el efecto del NaCl en el crecimiento, compuestos bioactivos y calidad de frutos de berenjena en dos estructuras protegidas.
2. Evaluar el efecto de la biofortificación con yodo en el crecimiento, actividad antioxidante y minerales en los frutos de berenjena en invernadero.

3. Evaluar el efecto de la biofortificación con selenio en el crecimiento, calidad nutracéutica de frutos de berenjena en invernadero.

LITERATURA CITADA

- Adamczewska-Sowińska, K., Krygier, M. and Turczuk, J. (2016). The yield of eggplant depending on climate conditions and mulching. *Folia Horticulturae*, 28(1): 19-24. <https://doi.org/10.1515/fhort-2016-0003>.
- Ali, M. and Abbasi, B. H. (2014). Light-induced fluctuations in biomass accumulation, secondary metabolites production and antioxidant activity in cell suspension cultures of *Artemisia absinthium* L. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 140: 223-227. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.08.008>.
- Bhushan, I., Sharma, M., Mehta, M., Badyal, S., Sharma, V., Sharma, I., Singh, I. and Sistla, S. (2021). Bioactive compounds and probiotics—a ray of hope in COVID-19 management. *Food Science and Human Wellness*, 10(2): 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.02.001>.
- Botella, M. Á., Hernández, V., Mestre, T., Hellín, P., García-Legaz, M. F., Rivero, R. M., Martínez, V., Fenoll, J. and Flores, P. (2021). Bioactive compounds of tomato fruit in response to salinity, heat and their combination. *Agriculture*, 11(6): 534. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060534>.
- Cakmak, I. and Kutman, U. Á. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *European Journal of Soil Science*, 69(1): 172-180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>.
- Cericola, F., Portis, E., Lanteri, S., Toppino, L., Barchi, L., Acciarri, N., Pulcini, L., Sala T. and Rotino G.L. 2014. Linkage disequilibrium and genome-wide association analysis for anthocyanin pigmentation and fruit color in eggplant. *BMC Genomics*. 15(1): 1-15. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-896>.
- Carvalho, S. and Vasconcelos, M., 2013. Producing more with less: ‘omics’ at the service of plant-based food biofortification. *Food Research International*. 54: 961–971. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.021>
- David, E. M., Lesharadevi, K., Dharanidharan, H., Akash, S., Prabhakaran, S., Firdous, S. and Parthasarathi, T. (2022). Inducing inherent salinity tolerance of eggplants by salt induction response. *F1000Research*, 11(244): 244. <https://doi.org/10.12688/f1000research.109257.1>.
- De Valença, A. W., Bake, A., Brouwer, I. D. and Giller, K. E. (2017). Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global Food Security*, 12: 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.12.001>.
- Dimkpa, C. O. and Bindraban, P. S. (2016). Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1): 7. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0346-6>.

- Garg, M., Sharma, N., Sharma, S., Kapoor, P., Kumar, A., Chunduri, V. and Arora, P. (2018). Biofortified crops generated by breeding, agronomy, and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world. *Frontiers in Nutrition*, 5: 12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00012>.
- Ghazi, D. (2018). Effect of iron and selenium on growth, yield and quality of eggplant under different mineral fertilization levels. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 9(10): 525-532. <https://doi.org/10.21608/jssae.2018.36456>
- Guaadaoui, A., Benaicha, S., Elmajdoub, N., Bellaoui, M. and Hamal, A. (2014). What is a bioactive compound? A combined definition for a preliminary consensus. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 3(3): 174-179. <https://doi.org/doi:10.11648/j.ijnfs.20140303.16>.
- Karimi, A., Kazemi, M., Samani, S. A. and Simal-Gandara, J. (2021). Bioactive compounds from by-products of eggplant: Functional properties, potential applications and advances in valorization methods. *Trends in Food Science & Technology*, 112: 518-531. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.027>.
- Khush, G. S., Lee, S., Cho, J. I. and Jeon, J. S. (2012). Biofortification of crops for reducing malnutrition. *Plant Biotechnology Reports*, 6(3): 195-202. <https://doi.org/10.1007/s11816-012-0216-5>.
- Lange, K. W. and Nakamura, Y. (2020). Food bioactives, micronutrients, immune function and COVID-19. *Journal of Food Bioactives*, 10. <https://doi.org/10.31665/JFB.2020.10222>.
- Li, Y., Zhang, J. J., Xu, D. P., Zhou, T., Zhou, Y., Li, S. and Li, H. B. (2016). Bioactivities and health benefits of wild fruits. *International journal of molecular sciences*, 17(8): <https://doi.org/1258.10.3390/ijms17081258>.
- Lo Scalzo, R. L., Fibiani, M., Francese, G., Alessandro, A. D., Rotino, G. L., Conte, P. and Mennella G. (2016). Cooking influence on physico-chemical fruit characteristics of eggplant (*Solanum melongena* L.). *Food Chem.* 194: 835-842. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.063>.
- Olum, S., Gellynck, X., Okello, C., Webale, D., Odongo, W., Ongeng, D. and De Steur, H. (2018). Stakeholders' perceptions of agronomic iodine biofortification: a SWOT-AHP analysis in Northern Uganda. *Nutrients*, 10(4): 407. doi: <https://doi.org/10.3390/nu10040407>.
- Peng, C., Wang, X., Chen, J., Jiao, R., Wang, L., Li, Y. M. and Chen, Z. Y. (2014). Biology of ageing and role of dietary antioxidants. *BioMed Research International*. <https://doi.org/10.1155/2014/831841>.
- Poljsak, B., Kovač, V. and Milisav, I. (2021). Antioxidants, Food Processing and Health. *Antioxidants*, 10(3): 433. <https://doi.org/10.3390/antiox10030433>.

- Rajendran, P., Nandakumar, N., Rengarajan, T., Palaniswami, R., Gnanadhas, E. N., Lakshminarasaiyah, U., Gopas, J. and Nishigaki, I. (2014). Antioxidants and human diseases. *Clinica Chimica Acta*, 436: 332-347. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2014.06.004>.
- Rashmi, H. B. and Negi, P. S. (2020). Health benefits of bioactive compounds from vegetables. In *Plant-derived Bioactives*. Springer, Singapore. pp. 115-166. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1761-7_5.
- Rouphael, Y., Kyriacou, M. C., Petropoulos, S. A., De Pascale, S. and Colla, G. (2018 a). Improving vegetable quality in controlled environments. *Scientia Horticulturae*, 234: 275-289. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.033>.
- Rouphael, Y., Petropoulos, S. A., Cardarelli, M. and Colla, G. (2018 b). Salinity as eustressor for enhancing quality of vegetables. *Scientia Horticulturae*, 234: 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.048>.
- Samtiya, M., Aluko, R. E., Dhewa, T. and Moreno-Rojas, J. M. (2021). Potential Health Benefits of Plant Food-Derived Bioactive Components: An Overview. *Foods*, 10(4): 839. <https://doi.org/10.3390/foods10040839>.
- Schiavon, M., Nardi, S., Dalla Vecchia, F. and Ertani, A. (2020). Selenium biofortification in the 21st century: Status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil*, 453(1): 245-270. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>.
- Singh, U., Praharaj, C. S., Chaturvedi, S. K. and Bohra, A. (2016). Biofortification: Introduction, approaches, limitations, and challenges. In *Biofortification of food crops*. Springer, New Delhi. pp. 3-18. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8_1.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2021. Anuario estadístico de la producción agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Septiembre 2022).
- Villa-Rivera, M. G. and Ochoa-Alejo, N. (2020). Chili Pepper Carotenoids: Nutraceutical Properties and Mechanisms of Action. *Molecules*, 25(23): 5573. <https://doi.org/10.3390/molecules25235573>.
- Walia, A., Gupta, A. K. and Sharma, V. (2019). Role of bioactive compounds in human health. *Acta Scientific Medical Science*, 3: 25-33.
- Wiesner-Reinhold, M., Schreiner, M., Baldermann, S., Schwarz, D., Hanschen, F. S., Kipp, A. P., Rowan, D. D. Bentley-Hewit, K. L. and McKenzie, M. J. (2017). Mechanisms of selenium enrichment and measurement in brassicaceous vegetables, and their application to human health. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1365. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01365>.
- Xu, D. P., Li, Y., Meng, X., Zhou, T., Zhou, Y., Zheng, J. and Li, H. B. (2017). Natural antioxidants in foods and medicinal plants: Extraction, assessment and resources. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(1): 96. <https://doi.org/10.3390/ijms18010096>

Zou, Z., Xi, W., Hu, Y., Nie, C. and Zhou, Z. (2016). Antioxidant activity of Citrus fruits. *Food Chemistry*, 196: 885-896.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072>.

CAPÍTULO II

SODIUM CHLORIDE ON BIOACTIVE COMPOUNDS OF EGGPLANT (*Solanum melongena* L.) GROWN IN HYDROPONICS UNDER TWO PROTECTED STRUCTURES

Published manuscript: Agrociencia

DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2732>

SUMMARY

The consumption of fruits and vegetables of nutritional quality increases due to their high amounts of bioactive compounds with antioxidant activity, to prevent diseases and improve health. The hypothesis is that salinity, light and temperature in different protected structures influence the chemical composition and nutritional value of eggplant (*Solanum melongena* L.) fruits. The objective was to evaluate the effect of different doses of sodium chloride (NaCl) on the concentration of bioactive compounds in eggplant fruits grown in hydroponics under greenhouse and shade mesh. Eggplants were grown in a hydroponic system in pots with tezontle. The experimental design was completely randomized with a 4×2 factorial arrangement, four doses of NaCl (0, 15, 30 and 45 mM) and two protected structures (greenhouse and shade mesh). The variables evaluated were fruit weight, firmness, total soluble solids (SST), titratable acidity (AT), sodium, vitamin C, phenols, total flavonoids and antioxidant activity. Fruits obtained from plants grown in greenhouses with 45 mM NaCl decreased 35.9 % in weight compared to fruits from the 30 mM NaCl shade mesh treatment; and increased 51.9 % in firmness compared to the 15 mM NaCl treatment under shade mesh. The 15 mM NaCl dose under shade mesh increased SST by 95.8 % compared to the 30 mM NaCl treatment in the greenhouse. Under shade mesh without salinity, the highest AT in fruits was obtained; also, it was observed that the AT of fruits under shade mesh was 60.5 % higher than the AT of fruits in the greenhouse; regardless of the NaCl dose. The highest fruit concentration was found in the 45 mM NaCl treatment in the greenhouse. Under shade mesh with 15 mM NaCl dose, the lowest concentration of vitamin C in fruit was recorded, being 37 % lower than the concentration of vitamin C with the same dose in the greenhouse. No significant differences were found in phenols and total flavonoids. Fruits from plants under shade mesh with the 30 mM NaCl dose had 165.2 % more antioxidant capacity than fruits from plants under shade mesh without salinity. It is concluded that the environmental conditions of temperature and radiation in the greenhouse promoted an increase in the concentration of bioactive compounds in eggplant fruits, which provides greater nutritional value.

Keywords: environment, antioxidants, stress, health, *Solanum melongena* L.

INTRODUCTION

Eggplant (*S. melongena*) is an agronomically important plant, grown and consumed in many countries (Cericola *et al.*, 2014), contains bioactive compounds considered as nutraceuticals (Lo Scalzo *et al.*, 2016). It is among the top 10 vegetables in terms of antioxidant content (Philippi *et al.*, 2016). The consumption of fruits and vegetables containing these compounds, have a beneficial effect on health as it helps in the prevention of various diseases in humans (Perin *et al.*, 2019).

The generation of technology or agronomic practices that positively regulate the synthesis and accumulation of secondary metabolites in plants is important to influence the antioxidant content in fruits (Perin *et al.*, 2019). Some practices that can be used include fertilizer application, planting date, irrigation efficiency and maturity at harvest, in addition to environmental factors, such as soil moisture, temperature and solar radiation, which stimulate the concentration of certain metabolites (Zou *et al.*, 2016). Light conditions inside a greenhouse change according to the cover materials, by filtering solar radiation or reducing light intensity. These materials are associated with plant quality, in visual properties, organoleptic properties and chemical composition (Rouphael *et al.*, 2018). Environmental changes affect the production of phenolic compounds as a response and adaptation mechanism of plants (Bacha *et al.*, 2017). In strawberry varieties grown under high radiation, the content of total phenols and flavonoids increased (Cervantes *et al.*, 2019) and in tomato plants grown under high temperature, the concentration of vitamin C increased (Botella *et al.*, 2021).

On the other hand, the response of greenhouse vegetables to salt stress depends on different factors, including genetic material, climatic conditions, phenological stage, duration of stress exposure, concentration and type of salt (Rouphael *et al.*, 2018). Salinity by NaCl can cause positive effects on fruit quality, improves bioactive compounds such as vitamin C and antioxidant activity (Petropoulos *et al.*, 2017). With doses of 25 and 50 mM NaCl increases flavonoid content in eggplant (Shishira *et al.*, 2016). Doses of 60 mM NaCl in thyme (*Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* L.) increase total phenols (Bistgani *et al.*, 2019); likewise, 50 mM NaCl dose increases antioxidant activity in edible

flowers of *Tagetes patula* L. (Chrysargyris *et al.*, 2018). According to the above, environmental conditions and salinity affect crop quality, chemical composition and nutritional value. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of different doses of sodium chloride (NaCl) on the concentration of bioactive compounds of eggplant fruits grown in hydroponics in greenhouse and under shade mesh.

MATERIALS AND METHODS

Plant Material and Growing Conditions

The experiment was conducted in the summer-autumn cycle (June-December) of 2019, in the hydroponics area of the Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine, in San Luis Potosi, Mexico. The structures used were a tunnel type greenhouse with dimensions 5.5 x 18 m with a white plastic cover and a chapel type shade mesh with the same dimensions and a black mesh cover. In the greenhouse, the average temperature was 23 °C with an average light intensity of 325.74 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; under the shade mesh the average temperature was 17 °C with an average light intensity of 183.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. This was measured with a HOBO logger (Onset UA-002-08 Pendant Temperature/ Light Data Logger) in each structure.

Eggplant ‘Black Beauty’ (Caloro[®]) was used as plant material with a germination percentage of 85 %, which was sown in polystyrene trays with 220 cavities, with a commercial substrate based on acid peat BM2 Berger[®]. At 60 d after sowing, they were transplanted to 10 L black plastic pots, with red tezontle as substrate with a granulometry of 5 to 6 mm. Seedlings with 12 cm height and four true leaves were used for transplanting, with 80 seedlings in each protected structure with a total of 160 plants, under a drip irrigation system. The crop was irrigated with Steiner’s universal solution (molc m^{-3}): 12 NO_3^- , 7 SO_4^{2-} , 1 H_2PO_4^- , 9 Ca^{+2} , 7 K^+ and 4 Mg^{+2} . The fertilizers used were $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 and H_3PO_4 . Micronutrients were added from Carboxy[®] Micro, which provided in mg L^{-1} : Fe 0.5, Zn 0.25, Mn 0.1, Mg 0.05 and B 0.05 in EDDHA chelated form. The pH of the solution was adjusted with H_3PO_4 to 5.5. At 54 d after transplanting (start of flowering), the treatments were applied to the two structures, NaCl (J. T. Baker[™], USA) was added to the Steiner solution at four doses: 0 (as control), 15, 30 and 45 mM.

Treatment Design and Experimental Design

The experiment was conducted in a completely randomized design. The treatments had a 4×2 factorial arrangement, where the four doses of NaCl were 0, 15, 30 and 45 mM

and two protected structures, greenhouse and shade mesh. The experimental unit was one plant and 20 replicates per treatment were established.

Determination of Weight at Harvest, Firmness and Sodium Concentration in Fruits

Mature fruits were harvested when they acquired a shiny black coloration, this was from 105 d after the application of the treatments and were weighed on a digital scale (Ohaus® PAJ4102N Gold series, USA), the weight was reported in grams. Firmness was measured with a penetrometer (QA Supplies, USA) with 11 mm plunger tip. For sodium concentration in the fruit, a two grams portion of the fruit was cut, ground in a mortar and pestle, and four drops were added to the ionometer for readings (Na⁺ Laqua Twin Compact Ion Meter, Horiba, Kyoto, Japan).

Determination of Bioactive Compounds in Fruits

For the evaluation of the concentration of bioactive and organoleptic compounds, four samples of ripe fruits were taken per treatment 100 d after the application of the treatments, washed with distilled water and dried in a forced air drying oven (Omron, Kyoto, Japan) at 70 °C until a constant weight was obtained. The dried fruits were ground (Krupps mill, Mexico) to obtain powder, which was used for the analysis.

Total Soluble Solids (TSS) and Titratable Acidity (TA)

Extracts were prepared with 0.1 g of dry sample in 12 mL of distilled water in a digital T 25 homogenizer (ULTRA-TURRAX®, IKA, USA) and filtered to determine total soluble solids and titratable acidity. TSS were determined in two drops of the filtrate which were placed in a digital pocket refractometer (PAL⁻¹, Atago®, Japan) and the results were reported in °Brix. TA was determined according to the methodology described by AOAC (1990), using phenolphthalein as indicator and the results were expressed as percentage of citric acid.

Vitamin C

For vitamin C analysis, 0.1 g of dry fruit sample was homogenized in 11 mL of distilled water in a digital T 25 homogenizer (ULTRA-TURRAX®, IKA, USA) and filtered.

Ascorbic acid was determined according to the spectrophotometric method described by da Silva *et al.* (2017) with some modifications. Briefly, 1 mL of homogenized and filtered sample was added to a beaker, 1 mL of a 1.5 % (w/v) acetate-urea solution, 3 mL of a 0.075 % (w/v) cupric acetate-cuproin solution and 5 mL of absolute ethanol. The absorbance was measured at 545 nm. Quantification was performed with an ascorbic acid calibration curve and the results are reported as ascorbic acid (AA) concentration in mg mL⁻¹.

Phenols

Total phenols were determined using the Folin-Ciocalteu spectrophotometric method (Singleton *et al.*, 1999), with some modifications. For the extract, 0.1 g of dry fruit sample was homogenized in 11 mL of distilled water in a digital T 25 homogenizer (ULTRA-TURRAX[®], IKA) and filtered. 200 µL of the sample was placed with 300 µL of distilled water in test tubes, plus 2.5 mL of Folin-Ciocalteu and 2 mL of NaCO₃. The samples were left to stand in a dark chamber for 2 h and the absorbance was measured at 760 nm. The standard curve was performed with gallic acid and the results are expressed in mg gallic acid equivalents (EAG) g⁻¹ dry weight.

Flavonoids

The concentration of total flavonoids was determined according to the modified AlCl₃ method (Arvouet-Grand *et al.*, 1994). For the extract, 0.2 g of dry sample was used in 12 mL of absolute methanol in a digital T 25 homogenizer (ULTRA-TURRAX[®], IKA, USA) and filtered. From this sample, 2.5 mL were taken and 2 mL of AlCl₃ were added and incubated in a dark chamber for 10 min. The absorbance of the samples was measured at 415 nm in a UV-Vis spectrophotometer (GENESYS 10S, Thermo Scientific[™], USA). A quercetin standard curve was performed and the results were expressed as mg quercetin equivalents (EQ) g⁻¹ dry weight.

Antioxidant Activity

Antioxidant activity was determined by the ABTS method described by Terán-Erazo *et al.* (2019).

Statistic Analysis

With the data obtained, analysis of variance and Tukey mean comparison tests ($p \leq 0.05$) were performed using the SAS statistical program v. 9.0 (SAS Institute Inc., 2002). In addition, a correlation analysis (Pearson correlation coefficients) and a principal component analysis were performed with Minitab v. 16 statistical package (Minitab Institute Inc., 2010).

RESULTS AND DISCUSSION

Fruit Weight

Eggplant fruit weight was influenced by the climatic conditions in the structures used; the interaction of the study factors caused significant differences (Table 1). Fruits obtained from eggplant plants grown in greenhouses with 45 mM NaCl were 35.9 % lighter than fruits from the 30 mM NaCl treatment with shade mesh (Table 1). In this study, fruit weight was more affected by NaCl when the greenhouse temperature was 23 °C. In eggplant, it has been reported that, mean air temperature between 22 and 19 °C in greenhouse increases fruit weight compared to those grown at temperatures of 11 °C (Valerga *et al.*, 2019). In tomato grown at 25 °C, the application of 60 mM NaCl decreased fruit weight by 35 %; with temperature of 35 °C, NaCl decreased fruit weight by 58 % in regard to the control grown with 1 mM NaCl at 25 °C (Botella *et al.*, 2021). On the other hand, salinity caused by the administration of 30, 60 and 90 mM NaCl decreased yield in native Mexican tomato genotypes, with the greatest decreases recorded in Campeche, in the order of 71.1, 80.1 and 89.6 %, respectively, all cases compared to the control without salinity (Ladewig *et al.*, 2021).

Table 1. Quality of eggplant fruits grown under two types of protected structures and different doses of NaCl.

Factor Level	Fruit weight (g)	Firmness (kg)	Total soluble solids (°Brix)	Titrateable acidity (%)
Interaction (EP × NaCl)				
I†, 0	428.43 ab	7.67 abc	8.40 bc	3.57 c
I, 15	453.73 ab	7.50 abc	7.50 bc	2.91 c
I, 30	431.30 ab	8.30 ab	7.20 c	2.83 c
I, 45	346.00 b	9.22 a	9.30 abc	3.36 c
MS‡, 0	414.38 ab	7.70 abc	12.60 ab	6.48 a
MS, 15	500.20 a	6.07 c	14.10 a	6.16 ab
MS, 30	539.85 a	6.85 bc	9.30 abc	3.97 bc
MS, 45	463.70 ab	6.17 c	9.00 abc	3.73 c

DMSH [§]	147.22	2.02	5.28	22.21
CV ^p	14.05	11.63	23.34	22.92

Means with different letters in each column are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).
[†]I: greenhouse; [¶]MS: shade netting; [§]DMSH: least significant difference; ^pCV: coefficient of variation.

Firmness

Fruits grown in greenhouse and with 45 mM NaCl doses had 51.9 % higher firmness compared to 15 mM NaCl under shade mesh, this effect can be attributed to increased light and temperature (Table 1). In contrast, Valerga *et al.* (2019) mentioned that firmness in eggplant fruits grown in greenhouse showed dissimilar changes according to harvest conditions; at temperatures of 22 °C, it decreased 38 % compared to temperatures of 11 °C. In tomato plants grown at 35 °C with 60 mM NaCl, fruit firmness decreased by 22 % in relation to fruit grown at 25 °C (Botella *et al.*, 2021). In tomato fruits with doses of 30 mM NaCl did not affect firmness, in contrast, with doses of 60 and 90 mM it increased by 10 % (Naeem *et al.*, 2020). Garriga *et al.* (2015) mentioned that the toxicity effects of Na⁺ and Cl⁻ ions increase the activity of pectinases and other enzymes that degrade cell wall, therefore, firmness decreases.

Total Soluble Solids

The 15 mM NaCl dose in combination with shade mesh increased SST in fruits by 95.8 % compared to 30 mM NaCl doses in greenhouse (Table 1). Ilić and Fallik (2017) report that under black mesh the transmission of blue light is higher and therefore, the plant has higher photosynthate production, which increases soluble solids in fruits. Also, high doses of NaCl promote higher SST content; in tomato plants grown with 60 mM NaCl at 25 and 35 °C, total soluble solids increased by 15 and 10 %, compared to the control with 1 mM NaCl (Botella *et al.*, 2021). In native tomato genotypes, doses 30, 60 and 90 mM NaCl caused increases from 25 % in total soluble solids (Ladewig *et al.*, 2021). Also in tomato, the addition of 50 and 100 mM NaCl to the nutrient solution increased total soluble solids by 80 % compared to the control (Carbajal-Vazquez *et al.*, 2020). In eggplant crop, upon application of 40 mM NaCl sugars such as sucrose, glucose and fructose accumulated in

response to salt stress, as they function as osmolytes to maintain cell turgor and protect membranes and proteins (Hannachi and Van Labeke, 2018).

Titrateable Acidity

The highest fruit AT was obtained in plants grown under shade mesh and without salinity, which exceeded by 128.9 % the value of fruits of plants treated with 30 mM NaCl in the greenhouse. Likewise, the treatment without salinity under shade mesh resulted in an average increase of 104.5 % in fruit AT compared to the value of fruits obtained in the greenhouse with all NaCl levels (0, 15, 30 and 45 mM; Table 1). Salt stress caused by the addition of 50 and 100 mM NaCl to the nutrient solution increased titrateable acidity by 63.6 and 65.9 % in tomato fruits, compared to the control (Carbajal-Vázquez *et al.*, 2020). Likewise, in tomato fruits from plants treated with 60 mM NaCl at 25 °C increased acidity by 26 %; whereas, at 35 °C there was no effect of NaCl (Botella *et al.*, 2021). In tomato, acidity increased by 39 % with 50 mM NaCl, which was attributed to the increase in the content of organic acids involved in the osmoregulation mechanism of plants under high salinity conditions (Costan *et al.*, 2020). On the contrary, in pepper fruits the application of 20.1 mM NaCl had no effect on titrateable acidity (Giuffrida *et al.*, 2014).

Sodium in Fruits

Fruits from plants grown in greenhouses with 45 mM NaCl doses showed higher sodium concentrations, exceeding on average 60 % of fruits from plants treated with 30 and 45 mM NaCl under shade mesh (Figure 1). In ‘Black Beauty’ eggplant plants, NaCl stress elicited an osmoregulatory response by accumulating Na⁺ and Cl⁻ and decreasing K⁺, Ca⁺², Mg⁺² and NO₃⁻ (Hannachi and Van Labeke, 2018). The WHO recommends an intake of 2 g Na⁺ day⁻¹ in adults (WHO, 2012). In this case, assuming an annual per capita consumption of eggplant of 700 g in Mexico, the sodium concentration obtained in this study with doses of 30 and 45 mM NaCl in greenhouse-grown fruits represents only 11 % of the recommended daily intake, therefore, the consumption of eggplant fruits with NaCl doses does not represent any health risk.

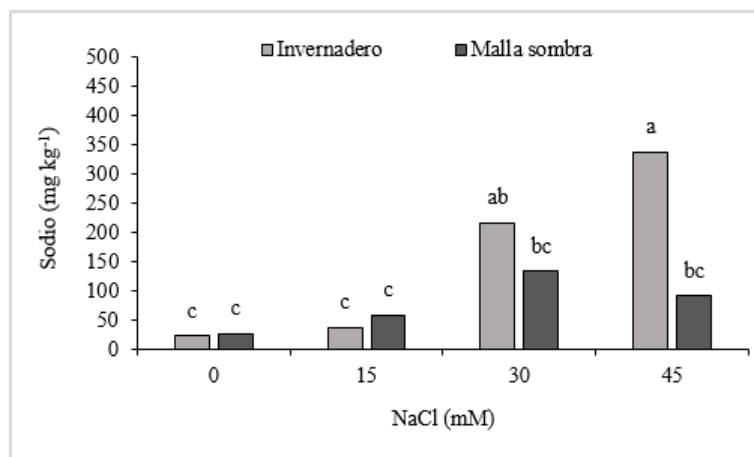


Figure 1. Sodium concentration in eggplant fruits from plants in response to the interaction protected structure and NaCl dose. Means with different letters in each subfigure are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

Flavonoids

The type of structure where the eggplant was grown, the application of NaCl doses and the interaction of the factors under study did not significantly affect the concentration of flavonoids in the fruits (Table 2). Contrary to what was observed here, Cervantes *et al.* (2019) found that flavonoid content increased 29 % in strawberry ‘Fortuna’ fruits exposed to light intensity of $1100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in macrotunnel, with respect to $440 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Brenes *et al.* (2020) found no effect on total flavonoids in eggplant plants with doses of 50, 100, 200 and 300 mM NaCl. In contrast, Shishira *et al.* (2016) indicated that in eggplant under salt stress the amount of total flavonoids increased with doses of 25 and 50 mM NaCl by 26 and 64 % compared to the control without salinity.

Table 2. Concentration of flavonoids and total phenols in eggplant fruits grown under two types of protected structures and different doses of NaCl.

Factor	Total flavonoids	Total phenols
Level	(mg EQ g ⁻¹)	(mg EAG g ⁻¹)
Protected structure (EP)		
I	73.92 a	507.93 a
M	74.79 a	429.81 b
DMSH	11.36	77.44
NaCl (mM)		

0	74.35 a	519.64 a
15	71.33 a	514.91 a
30	72.82 a	381.13 a
45	78.92 a	459.80 a
DMSH	21.65	147.56
Interaction (EP × NaCl)		
I [†] , 0	71.65 a	517.09 a
I, 15	66.93 a	543.31 a
I, 30	74.64 a	467.56 a
I, 45	82.60 a	503.74 a
MS [‡] , 0	77.07 a	522.19 a
MS, 15	75.74 a	486.50 a
MS, 30	71.02 a	294.70 a
MS, 45	75.34 a	415.85 a
DMSH [§]	37.00	252.18
CV ^p	20.48	22.14

Means with different letters in each column and study factor are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$). [†]I: greenhouse; [‡]MS: shade netting; [§]DMSH: least significant difference; ^pCV: coefficient of variation.

Phenols

Fruits harvested from greenhouse-grown plants showed 18.1 % higher phenolic concentrations than fruits of plants under shade mesh (Table 2). Light intensity under shade mesh was $183 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and in greenhouse $326 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, which increased the total phenolic concentration. With the doses of NaCl applied, no significant differences were detected in phenols in fruits (Table 2), the concentrations ranged between 400 and 580 mg EAG 100 g^{-1} . Brenes *et al.* (2020) found that doses of 50, 100, 200 and 300 mM NaCl did not affect the total phenolic content in eggplant plants. In the interaction of the two factors under study, no significant differences in phenols in fruits were found (Table 2). Bacha *et al.* (2017) mentioned that the production and accumulation of phenolic compounds is a response and adaptation mechanism of plants exposed to stressful conditions.

Vitamin C

The interaction of the two factors under study had significant effects on the concentration of vitamin C in fruits (Figure 2A). Fruits from plants grown with 0, 15 and 45 mM NaCl doses in greenhouse and without salinity under shade mesh had on average 33 % and 41 % higher vitamin C concentration than fruits from plants treated with 45 mM NaCl and 15 mM NaCl under shade mesh, respectively. The 50 mM NaCl dose did not cause differences in vitamin C content in tomato fruits (Costan *et al.*, 2020) and with the application of 30 to 90 mM NaCl, it increased from 11 to 25 % (Naeem *et al.*, 2020). In tomato plants, vitamin C concentration increased by 16 and 26 % with doses of 1 and 60 mM NaCl with high temperature 35 °C, relative to 25 °C, indicating the effect of heat stress and no effect of salinity (Botella *et al.*, 2021). Fenech *et al.* (2019) mentioned that hydrogen peroxide (H₂ O₂) is responsible for lightinduced oxidative damage. Under high irradiance conditions during photosynthesis, ascorbate is involved in the removal of excess H₂ O₂ (Wheeler *et al.*, 2015). In this study, the increase in vitamin C concentration could be due to the light intensity in the greenhouse which was 325.74 μmol m⁻², higher than that recorded under shade mesh (183.22 μmol m⁻² s⁻¹).

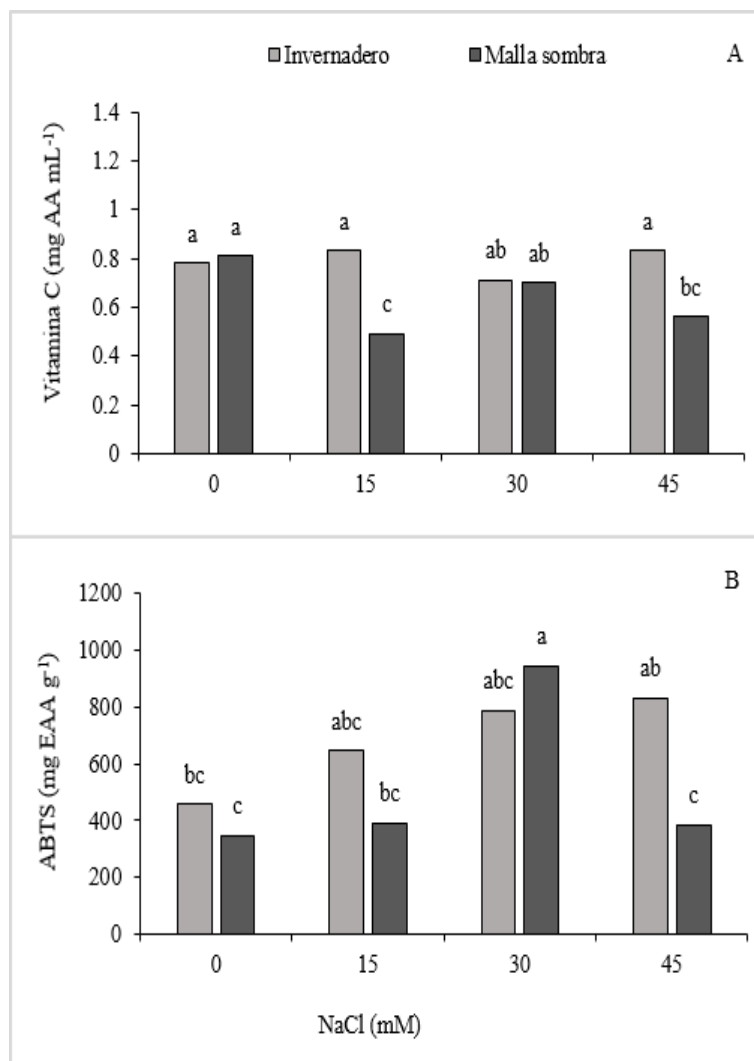


Figure 2. Vitamin C concentration and ABTS antioxidant activity in eggplant fruits from plants grown in response to protected structure and NaCl dosage. Means with different letters in each subfigure are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

Antioxidant Activity

The interaction of the factors under study had a significant effect on antioxidant activity (Figure 2B). Fruits from plants under shade mesh with the 30 mM NaCl dose increased 165.2 % antioxidant capacity compared to fruits from plants produced under shade mesh without salinity. According to Khanahmadi *et al.* (2010) upon salt stress induction plants increase antioxidant substances for their defense against oxidative stress. In the greenhouse, the light intensity was $326 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and under the shade mesh it was $183 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, suggesting an increase in antioxidant activity. Plants accumulate a number of phenolic compounds and antioxidants as a protective measure against intense light and

UV rays (Ilić and Fallik, 2017). Antioxidant activity increased in edible flowers of *Tagetes patula* L. by 11 % with the dose 50 mM NaCl (Chrysargyris *et al.*, 2018).

Principal Component Analysis

Principal component analysis was performed on the original data set of bioactive compounds in fruits. The first three components explained 88.6 % of the variability in the data (37.7, 27.4, 23.5 %) obtained from the six bioactive compounds analyzed. The scatter plot was done with PC1 and PC2, which together explained 65.1 % of the variability in the original data (Figures 3A-B). In PC1, the positive correlations with the highest values were ABTS antioxidant activity (0.59) and vitamin C (0.70). Antioxidant activity increases when inducing stress to plants (Chrysargyris *et al.*, 2018). Moreover, ascorbic acid acts effectively in response to oxidative stress, it depends on the need generated by the plant environment and physiological situation (Shishira *et al.*, 2016). In PC2, the positive correlations with higher values were phenols (0.58) and flavonoids (0.75). The influence of protected greenhouse structure as well as NaCl doses shows data that have an effect on this variability. Also, a group of data distant from the axis related to the 30 mM NaCl dose was distinguished.

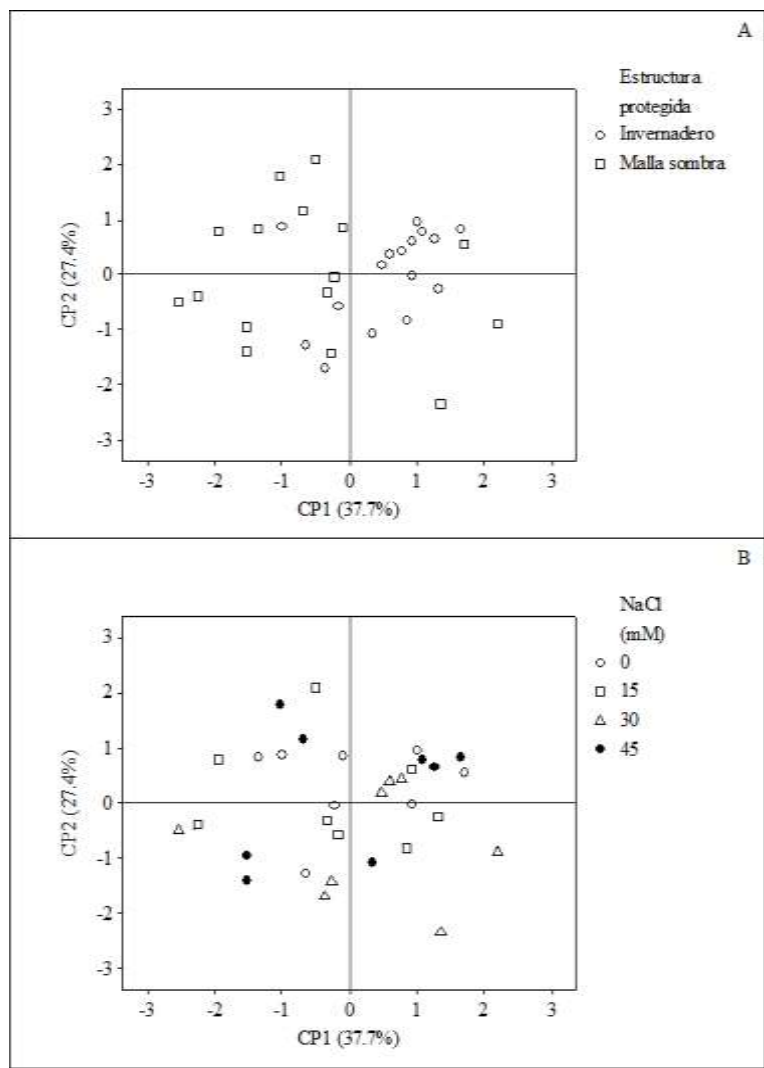


Figure 3. Point distribution derived from principal component analysis of eggplant bioactive compounds in two protected structures and NaCl doses.

CONCLUSIONS

Eggplant production in greenhouse with doses of 30 and 45 mM NaCl increased vitamin C concentration and antioxidant activity in fruits. Under shade mesh, the 30 mM NaCl dose increased antioxidant activity. Thus, the environmental conditions of temperature and radiation in the greenhouse promoted an increase in the concentration of bioactive compounds in eggplant fruits, which in turn provides greater nutritional value.

LITERATURE CITED

- AOAC. 1990. Official Methods and Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Helrich, K. (ed.). Arlington, Virginia USA. 1298 p.
- Arvouet-Grand A, Vennat B, Pourrat A, Legret P. 1994. Standardisation dun extrait de propolis et identification des principaux constituents. *Journal Pharmacie de Belgique* 49 (6): 462–468.
- Bacha H, Tekaya M, Drine S, Guasmi F, Touil L, Enneb H, Triki T, Cheour F, Ferchichi A. 2017. Impact of salt stress on morpho-physiological and biochemical parameters of *Solanum lycopersicum* cv. Microtom leaves. *South African Journal of Botany* 108: 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.08.018>
- Bistgani ZE, Hashemi M, DaCosta M, Craker L, Maggi F, Morshedloo MR. 2019. Effect of salinity stress on the physiological characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of *Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* Celak. *Industrial Crops and Products* 135 (1): 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.055>
- Botella MÁ, Hernández V, Mestre T, Hellín P, García-Legaz MF, Rivero RM, Martínez V, Fenoll J, Flores P. 2021. Bioactive compounds of tomato fruit in response to salinity, heat and their combination. *Agriculture* 11 (6): 534. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060534>
- Brenes M, Solana A, Boscaiu M, Fita A, Vicente O, Calatayud A, Prohens J, Plazas M. 2020. Physiological and biochemical responses to salt stress in cultivated eggplant (*Solanum melongena* L.) and in *S. insanum* L., a close wild relative. *Agronomy* 10 (5): 651. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050651>
- Carbajal-Vazquez VH, Gomez-Merino FC, Herrera-Corredor JA, Contreras-Oliva A, Alcantar-Gonzalez G, Trejo-Téllez LI. 2020. Effect of titanium foliar applications on tomato fruits from plants grown under salt stress conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 48 (2): 924–937. <https://doi.org/10.15835/nbha48211904>
- Cericola F, Portis E, Lanteri S, Toppino L, Barchi L, Acciarri N, Pulcini L, Sala T, Rotino GL. 2014. Linkage disequilibrium and genome-wide association analysis for anthocyanin pigmentation and fruit color in eggplant. *BMC Genomics* 15: 896. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-15-896>
- Cervantes L, Ariza MT, Gomez-Mora JA, Miranda L, Medina JJ, Soria C, Martínez-Ferri E. 2019. Light exposure affects fruit quality in different strawberry cultivars under field conditions. *Scientia Horticulturae* 252 (4): 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.058>
- Chrysargyris A, Tzionis A, Xylia P, Tzortzakis N. 2018. Effects of salinity on tagetes growth, physiology, and shelf life of edible flowers stored in passive modified

- atmosphere packaging or treated with ethanol. *Frontiers in Plant Science* 9: 1765. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01765>
- Costan A, Stamatakis A, Chrysargyris A, Petropoulos SA, Tzortzakis N. 2020. Interactive effects of salinity and silicon application on *Solanum lycopersicum* growth, physiology and shelf-life of fruit produced hydroponically. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 100 (2): 732–743. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10076>
- da Silva TL, Aguiar-Oliveira E, Mazalli MR, Kamimura ES, Maldonado RR. 2017. Comparison between titrimetric and spectrophotometric methods for quantification of vitamin C. *Food Chemistry* 224: 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.052>
- Fenech M, Amaya I, Valpuesta V, Botella M.A. 2019. Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation. *Frontiers in Plant Science* 9: 2006. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.02006>
- Garriga M, Muñoz CA, Caligari PD, Retamales JB. 2015. Effect of salt stress on genotypes of commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*). *Scientia Horticulturae* 195: 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.036>
- Giuffrida F, Graziani G, Fogliano V, Scuderi D, Romano D, Leonardi C. 2014. Effects of nutrient and NaCl salinity on growth, yield, quality and composition of pepper grown in soilless closed system. *Journal of Plant Nutrition* 37: 1455–1474. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.881874>
- Hannachi S, Van Labeke MC. 2018. Salt stress affects germination, seedling growth and physiological responses differentially in eggplant cultivars (*Solanum melongena* L.). *Scientia Horticulturae* 228: 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.002>
- Ilić ZS, Fallik E. 2017. Light quality manipulation improves vegetable quality at harvest and postharvest: A review. *Environmental and Experimental Botany* 139: 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.006>
- Khanahmadi M, Rezazadeh SH, Taran M. 2010. *In vitro* antimicrobial and antioxidant properties of *Smyrniium cordifolium* Boiss. (Umbelliferae) extract. *Asian Journal of Plant Sciences* 9 (2): 99–103. <https://doi.org/10.3923/ajps.2010.99.103>
- Ladewig P, Trejo-Téllez LI, Servín-Juárez R, Contreras-Oliva A, Gomez-Merino FC. 2021. Growth, yield and fruit quality of Mexican tomato landraces in response to salt stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 49 (1): 12005–12005. <https://doi.org/10.15835/nbha49112005>
- Lo Scalzo RL, Fibiani M, Francese G, D'Alessandro A, Rotino GL, Conte P, Mennella G. 2016. Cooking influence on physico-chemical fruit characteristics of eggplant (*Solanum melongena* L.). *Food Chemistry* 194: 835–842. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.063>

- Minitab Inc. 2010. Statistical Software; Minitab. Inc. version 16: State College, PA, USA.
- Naeem M, Basit A, Ahmad I, Mohamed HI, Wasila H. 2020. Effect of salicylic acid and salinity stress on the performance of tomato plants. *Gesunde Pflanzen* 72: 393–402. <https://doi.org/10.1007/s10343-020-00521-7>
- Perin EC, da Silva Messias R, Borowski JM, Crizel RL, Schott IB, Carvalho IR, Rombladi CV, Galli V. 2019. ABA-dependent salt and drought stress improve strawberry fruit quality. *Food Chemistry* 271: 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.213>
- Petropoulos SA, Levizou E, Ntatsi G, Fernandes A, Petrotos K, Akoumianakis K, Barros L, Ferreira IC. 2017. Salinity effect on nutritional value, chemical composition and bioactive compounds content of *Cichorium spinosum* L. *Food Chemistry* 214: 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.080>
- Philippi K, Tsamandouras N, Grigorakis S, Makris DP. 2016. Ultrasound-assisted green extraction of eggplant peel (*Solanum melongena*) polyphenols using aqueous mixtures of glycerol and ethanol: optimisation and kinetics. *Environmental Processes* 3: 369–386. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0140-8>
- Rouphael Y, Kyriacou MC, Petropoulos SA, De Pascale S, Colla G. 2018. Improving vegetable quality in controlled environments. *Scientia Horticulturae* 234: 275–289. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.033>
- SAS Institute Inc. 2002. Statistical Analysis System version 9.0. Windows. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.
- Shishira T, Nivedita P, D'souza Myrene R, Singh Kavitha G. 2016. Antioxidant marker response of *Solanum melongena* to salinity stress. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 8 (7): 533–539.
- Singleton VL, Orthofer R, Lamuela MR. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology* 299: 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Terán-Eraza B, Alia-Tejacal I, Balois-Morales R, Juárez-Lopez P, López-Guzmán GG, Pérez-Arias GA, Núñez-Colín CA. 2019. Caracterización física, química y morfológica de frutos de guanábana (*Annona muricata* L.). *Agrociencia* 53 (7): 1013–1027.
- Valerga L, Darré M, Zaro MJ, Arambarri A, Vicente AR, Lemoine ML, Concellón A. 2019. Micro-structural and quality changes in growing dark-purple eggplant (*Solanum melongena* L.) as affected by the harvest season. *Scientia Horticulturae* 244: 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.032>
- Wheeler G, Ishikawa T, Pornsaksit V, Smirnoff N. 2015. Evolution of alternative biosynthetic pathways for vitamin C following plastid acquisition in photosynthetic eukaryotes. *Elife* 4: e06369. <https://doi.org/10.7554/eLife.06369>

WHO (World Health Organization). 2012. Guideline: Sodium intake for adults and children. Geneva, Italy. 46 p.

Zou Z, Xi W, Hu Y, Nie C, Zhou Z. 2016. Antioxidant activity of *Citrus* fruits. Food Chemistry 196: 885–896. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072>

CAPÍTULO III

**CULTIVO DE BERENJENA (*Solanum melongena* L.) EN HIDROPONÍA BAJO
INVERNADERO Y MALLA SOMBRA**

**EGGPLANT (*Solanum melongena* L.) CULTURE IN HYDROPONICS UNDER
GREENHOUSE AND SHADE NET WITH SALINE STRESS**

Manuscrito enviado: ITEA-Información Técnica Económica Agraria

RESUMEN

Las plantas están expuestas a factores que limitan su crecimiento y rendimiento, como las condiciones ambientales y la salinidad. En la presente investigación se evaluó el crecimiento y concentraciones iónicas en plantas de berenjena en hidroponía bajo invernadero y malla sombra con estrés salino por NaCl. En plantas de berenjena cultivadas en las dos estructuras se aplicaron dosis de NaCl 0, 15, 30 y 45 mM. Las variables evaluadas fueron: rendimiento, biomasa seca, área foliar, unidades SPAD, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y concentración de iones en hojas NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} y Na^+ . Los resultados mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), con incremento en el rendimiento, área foliar, el NDVI y la concentración de NO_3^- en hojas bajo malla sombra. La dosis aplicada de 15 mM de NaCl disminuyó la biomasa seca y el área foliar; el rendimiento y la concentración de NO_3^- fue menor con dosis de 30 y 45 mM, sin embargo, aumentó la concentración de Ca^{2+} y Na^+ en hojas. La interacción entre los factores en estudio mostró que aplicar 15 y 30 mM de NaCl en invernadero aumenta la biomasa, la concentración de Ca^{2+} y Na^+ en hojas y en malla sombra aumentó la concentración de NO_3^- y Ca^{2+} en las hojas. La dosis de 45 mM afectó negativamente el rendimiento en las dos estructuras. Cultivar bajo malla sombra reduce los efectos negativos del estrés salino en el crecimiento y rendimiento de la berenjena.

Palabras clave: Cultivo protegido, intensidad de luz, solución nutritiva, salinidad, NaCl.

ABSTRACT

Plants are exposed to factors that limit their growth and yield, such as environmental conditions and salinity. The present research evaluated growth and ionic concentrations in eggplant plants in hydroponics under greenhouse and shade mesh with saline stress by NaCl. Doses of NaCl 0, 15, 30 and 45 mM were applied to eggplant grown in the two structures. The variables evaluated were: yield, dry biomass, foliar area, SPAD units, normalized difference vegetation index (NDVI) and ion concentration in NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} and Na^+ leaves. The results showed significant differences ($p \leq 0.05$), with an increase in yield, leaf area, NDVI and the concentration of NO_3^- in leaves under shade net. The applied dose of 15 mM of NaCl decreased dry biomass and leaf area; the yield and the concentration of NO_3^- was lower with doses of 30 and 45 mM, however, increased the concentration of Ca^{2+} and Na^+ in leaves. The interaction between the factors under study showed that applying 15 and 30 mM of NaCl in greenhouse increases the biomass, the concentration of Ca^{2+} and Na^+ in the leaves and in the shade net increased the concentration of NO_3^- and Ca^{2+} on the leaves. The 45 mM dose negatively affected the yield on both structures. Growing under shade net reduces the negative effects of saline stress on eggplant growth and yield.

Keywords: Protected crop, light intensity, nutrient solution, salinity, NaCl.

INTRODUCCIÓN

La berenjena (*Solanum melongena* L.), también conocida como guinea es una especie de importancia agronómica y económica de la familia de las solanáceas (Gürbüz *et al.*, 2018). Es un cultivo versátil adaptado a diferentes regiones climáticas y se puede producir durante todo el año, es perenne, pero se cultiva comercialmente como anual (Priyadarshini *et al.*, 2016).

En las prácticas agrícolas de todo el mundo, las plantas están expuestas a diversos factores de estrés que limitan el rendimiento, el crecimiento y la calidad como sequía, salinidad, temperatura y otros (Vázquez-Hernández *et al.*, 2019). Al respecto, las condiciones climáticas influyen en la obtención de altos rendimientos en berenjena en ambientes secos, cálidos y moderados, sin embargo, es sensible a las heladas y el crecimiento está limitado cuando la temperatura es menor a 16 °C y mayor a 30 °C (Adamczewska-Sowińska *et al.*, 2016). El cultivo protegido es una alternativa para controlar las condiciones ambientales, además aumenta la calidad de los cultivos sin efectos negativos en el rendimiento (Rouphael *et al.*, 2018). Las condiciones de luz pueden mejorar la actividad fotosintética de las plantas (Kyriacou *et al.*, 2016), dentro de un invernadero están influenciadas por los materiales de la cubierta, que permiten lograr condiciones de luz específicas, debido a que filtran la radiación solar al reducir la intensidad de la luz a través de la película fotoselectiva (Ilić y Fallik *et al.*, 2017). Las mallas negras reducen la cantidad, pero no la calidad de luz que llega a las plantas (Shahak, 2008), además reduce la temperatura del aire y el suelo, con menor estrés por calor en las plantas (Ilić y Fallik *et al.*, 2017). En plantas de berenjena en invernadero el número de frutos por planta se aumenta a temperaturas de 15 y 17 °C con diferentes intensidades de luz, y se mejora el peso fresco de los frutos a 19 y 20 °C con intensidad de luz baja (Uzun, 2007).

Por otra parte, el estrés salino es un estrés abiótico que disminuye la productividad de los cultivos, con impacto negativo en las funciones morfológicas (Arif *et al.*, 2020), bioquímicas y fisiológicas del crecimiento y desarrollo de las plantas (Hatamnia *et al.*, 2013). La salinidad afecta la calidad de los cultivos, al influir en la absorción y el

transporte de iones, provoca desordenes nutricionales en los tejidos vegetales (Martínez-Ballesta *et al.*, 2010), además de pérdida de agua, reducción de la transpiración y concentraciones altas de Na^+ y Cl^- , que son tóxicos para las plantas (Jaramillo-Roman *et al.*, 2020). El uso de NaCl en la solución nutritiva en tomate reduce la materia seca, altura, número de hojas y área foliar (Romero-Aranda *et al.*, 2001), en pimiento con dosis de 30 mM de NaCl en la solución nutritiva disminuye la biomasa total, área foliar y el rendimiento (Rubio *et al.*, 2009).

En berenjena la sal induce alteraciones morfofisiológicas y bioquímicas (Abbas *et al.*, 2010), este cultivo se considera sensible o moderadamente sensible a la salinidad (Ünlükara *et al.*, 2010), sin embargo, existen reportes contradictorios sobre su tolerancia a la salinidad (Priyadarshini *et al.*, 2016). En plantas de berenjena con dosis a partir de 20 mM de NaCl disminuyó la biomasa seca (Hannachi y Van Labeke, 2018), con 50 y 150 mM disminuyó el área foliar, la biomasa y la concentración de K^+ (Assaha *et al.*, 2013). En cultivares de berenjena en hidroponía se observó una marcada disminución en la biomasa y en el rendimiento debido al estrés salino con 100 mM de NaCl (Abbas *et al.*, 2010), con 150 mM disminuyó la biomasa y la concentración de Ca^{2+} y K^+ (Shahbaz *et al.*, 2013). En contraste, con 25 mM NaCl en la solución nutritiva no mostró influencia en el área de la hoja (Savvas y Lenz 2000), en germinación de cultivares de berenjena con dosis de 20 mM y en etapa de crecimiento con dosis de 20 y 40 mM no se observaron efectos en la concentración de K^+ , y con dosis de 20, 40 y 80 mM de NaCl no cambió la concentración de Ca^{2+} en hojas (Hannachi y Van Labeke, 2018). Además, dosis de 15, 30 y 45 mM de NaCl tienen efectos positivos en la calidad de frutos de berenjena como °Brix, vitamina C y actividad antioxidante (Lara-Izaguirre *et al.*, 2022).

La respuesta de las hortalizas de invernadero al estrés salino depende del material genético, condiciones ambientales, etapa fenológica y el tipo de fuente de sal, concentración y el tiempo de exposición (Rouphael *et al.*, 2018). Varias condiciones adversas en combinación pueden provocar una respuesta diferente a la que provocaría un solo tipo de estrés, es importante el estudio e identificación de qué respuestas promueven o mantienen el crecimiento y desarrollo de las plantas durante el estrés, para comprender el proceso desde el punto de vista del rendimiento agrícola (Priyadarshini *et al.*, 2016).

Por lo anterior, el objetivo es evaluar el crecimiento y concentraciones iónicas en plantas de berenjena en hidroponía bajo invernadero y malla sombra con estrés salino por NaCl.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio Experimental y Material Vegetal

El trabajo experimental se realizó en el área de cultivos hidropónicos de la Facultad de Agronomía y Veterinaria ubicada en San Luis Potosí, México, en el ciclo de cultivo verano-otoño del 2019 en dos sitios de cultivo, invernadero y malla sombra.

Para este estudio se utilizaron semillas de berenjena variedad Black Beauty (Caloro), se sembraron en charolas de poliestireno de 220 cavidades con sustrato comercial a base de turba ácida. El trasplante al sistema de producción se llevó a cabo a los 60 días después de la siembra en bolsas de plástico negro de 10 L de volumen, con tezontle rojo como sustrato con una granulometría de 5-6 mm, bajo un sistema de riego por goteo, se consideró una densidad de población de 0.75 planta·m².

Para la nutrición del cultivo se empleó la solución nutritiva universal de Steiner (1984) (en meq L⁻¹): 12 NO₃⁻, 7 SO₄²⁻, 1 H₂PO₄⁻, 9 Ca²⁺, 7 K⁺ y 4 Mg²⁺. Los fertilizantes utilizados fueron Ca(NO₃)₂·4H₂O, KNO₃, MgSO₄·7H₂O, K₂SO₄ y H₃PO₄. Los micronutrientes se añadieron con Carboxy Micro, el cual aportó Fe 5%, Zn 2.5%, Mn 1% y B 0.5% en forma quelatada EDDHA. El pH de la solución se ajustó con ácido fosfórico a 5.5.

Tratamientos

Se utilizaron dos condiciones ambientales de crecimiento: un invernadero tipo túnel de dimensiones 5.5 x 18 m con cubierta plástica color blanco y una malla sombra tipo capilla con las mismas dimensiones con cubierta de malla color negro. En el invernadero se mostró una temperatura promedio de 23 °C y una intensidad luminosa promedio de 325.74 μmol m⁻² s⁻¹. En la malla sombra una temperatura promedio de 17 °C con una intensidad luminosa promedio de 183.22 μmol m⁻² s⁻¹ (registrador HOBO Onset UA-002-08 Pendant Temperature/Light Data Logger).

Los tratamientos de salinidad se aplicaron bajo cada estructura protegida a los 54 días después del trasplante (inicio de la floración). Se añadió NaCl (J.T. Baker™) a la solución Steiner en tres dosis: 0, 15, 30 y 45 mM.

Variables Evaluadas a la Cosecha

Se cosecharon frutos maduros con una coloración negro brillante, en tres cortes a partir de los 105 días después de la aplicación de NaCl y se pesaron en una balanza digital (Ohaus® PAJ4102N Gold series, Parsippany, New Jersey, USA), el peso se reportó en g y el rendimiento en g por planta. En la malla sombra se cosecharon los frutos en tres fechas, 105 ddt, 130 ddt y 154 ddt. En el invernadero se cosecharon a los 130 ddt y 154 ddt.

A los 131 días se midió área foliar (medidor laser de área foliar CI-202 CID Bio-Science, Camas, Washington, USA) y posteriormente se colocaron tallo y hoja a la estufa para obtener la biomasa seca aérea (estufa de secado Omron, Kyoto, Japón y balanza digital, Ohaus® PAJ4102N Gold series, Parsippany, New Jersey, USA) a una temperatura de 72 °C hasta peso constante.

Antes de la cosecha se midieron las unidades SPAD (Soil Plant Analysis Development, SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter, 2900P, Spectrum Technologies, Aurora, Illinois, USA) en hojas intermedias y visiblemente sanas y el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, GreenSeeker Trimble Handheld Crop Sensor, Sunnyvale, California, USA), al colocar el medidor a 30 cm de distancia de la parte apical de la planta.

Para obtener la concentración de nutrientes, se midieron los iones del extracto celular de peciolo Na^+ , NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} con ionómetros (Laqua Twin Compact Ion Meter, Horiba, Kyoto, Japón) reportados en mg L^{-1} .

Diseño Experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar. La unidad experimental fue una planta por maceta, fueron cuatro tratamientos de NaCl en cada estructura protegida y 20 repeticiones por tratamiento, con 80 unidades experimentales por estructura. Con un total de ocho tratamientos y 160 plantas.

Análisis Estadístico

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

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa Seca

Se mostraron diferencias ($p \leq 0.05$) en las plantas cultivadas en las dos estructuras protegidas, en invernadero la biomasa seca fue mayor en 18% (Tabla 1). De acuerdo con Adamczewska-Sowińska *et al.* (2016) mencionaron que la producción de berenjena depende en gran medida de las condiciones climáticas, y que el crecimiento se ve limitado por temperaturas inferiores a 16 °C. Al respecto, en lechuga al inducir estrés con luz elevada de $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ la biomasa seca aumentó 11% (Oh *et al.*, 2009), en otro estudio, con $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aumentó 50% en comparación con la menor intensidad de luz $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Fu *et al.*, 2017).

Con las dosis 30 y 45 mM de NaCl aplicadas disminuyó la biomasa seca ($p \leq 0.05$) en 26% en comparación con 0 mM (Tabla 1). De acuerdo con Hannachi y Van Labeke (2018) en cultivares de berenjena en invernadero con dosis a partir de 20 mM de NaCl disminuyó la biomasa seca en 30% y con dosis de 150 mM de 42 a 62% (Shahbaz *et al.*, 2013). Con dosis de 50 mM en plantas de berenjena la biomasa seca disminuyó en 49% (Assaha *et al.*, 2013), en este sentido, la reducción del peso seco de brotes y raíces es el resultado del estrés hídrico inducido en los tejidos por el estrés salino (Debnath *et al.*, 2018).

En la interacción de los factores de estudio disminuyó la biomasa seca ($p \leq 0.05$) al aplicar las dosis de NaCl en ambas estructuras, sin embargo, la disminución en la biomasa fue mayor en los tratamientos aplicados en el invernadero en 43% con dosis de 45 mM (Tabla 1). Zhang *et al.* (2020) mencionaron que el estrés salino generalmente inhibe el crecimiento de las plantas y puede depender de las condiciones de luz; en plantas de tomate bajo intensidad de luz de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con 80 mM de NaCl disminuyó la biomasa seca en 33% respecto a 0 mM, mientras que bajo luz de $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con 80 mM se aumentó la reducción a 46% respecto a 0 mM.

Área Foliar

Se mostraron diferencias significativas en el cultivo con la estructura utilizada ($p \leq 0.05$), bajo invernadero fue menor el área foliar en 16% comparado con la malla sombra

(Tabla 1). De acuerdo con Oh *et al.* (2009), en lechuga al inducir el estrés con luz alta de $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ disminuyó el área foliar en 23%. El ambiente luminoso al que se encuentran expuestas las plantas afecta su crecimiento y desarrollo, esto determina su morfología foliar y su fisiología (Azcón-Bieto *et al.*, 2008).

Con las dosis de NaCl aplicadas, disminuyó el área foliar ($p \leq 0,05$) entre 21 a 30% (Tabla 1). Esto coincide con Assaha *et al.* (2013) en berenjena donde la salinidad por NaCl disminuyó el área foliar con dosis de 50 mM en 50%. Sin embargo, Hannachi y Van Labeke (2018) mencionaron que esto puede variar, según la especie y la variedad, en berenjena Black Beauty 80 mM de NaCl parece ser el nivel umbral entre el estrés osmótico e iónico. Para la mayoría de las plantas un nivel de 40 mM de NaCl alrededor de las raíces disminuye la tasa de crecimiento de los brotes, debido a que la salinidad provoca que las células de las hojas pierdan agua, reduce volumen y turgencia, por lo que las hojas son más pequeñas y gruesas (Munns y Tester 2008).

La interacción de los factores en estudio, con el uso de estructuras protegidas y la aplicación de NaCl disminuyeron el área foliar ($p \leq 0,05$) tanto en invernadero como en malla sombra (Tabla 1). Sin embargo, en el cultivo bajo malla sombra el área foliar fue mayor en 15% sin la aplicación de NaCl comparado con el invernadero. La aplicación de las dosis en malla sombra disminuyó 20% el área foliar y en invernadero entre 18 y 37%. Esta reducción se debe a la disminución del intercambio de gases en las hojas durante el estrés salino, lo que representa una estrategia morfológica adaptativa para la tolerancia a la sal, como sucedió en plantas de tomate con dosis de 50 y 150 mM de NaCl donde se mostró una reducción del 15 y 41% respectivamente (Bacha *et al.*, 2017), y en plantas de pimiento con 30 mM disminuyó el área foliar en 27% con respecto a las plantas no estresadas (Rubio *et al.*, 2009). En plantas de tomate el estrés salino de 80 mM de NaCl bajo intensidad de luz de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ condujo a una reducción del 37% respecto a 0 mM del área foliar, el uso de 80 mM con intensidad de luz de $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ disminuyó 48% respecto a 0 mM (Zhang *et al.*, 2020).

Rendimiento

Se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) en las plantas cultivadas bajo las estructuras; en malla sombra las condiciones de menor intensidad de luz y temperatura mejoraron el peso de los frutos en 70% (Tabla 1) y además la cosecha inició 25 días antes que en invernadero. Caso contrario, el aumento de la intensidad de la luz en el cultivo de berenjena resultó en un mayor peso de los frutos (Uzun, 2007) y en lechugas con temperaturas altas de 33 °C mostró 30% mayor rendimiento que a 25 °C (Sublett *et al.*, 2018).

La aplicación de dosis de NaCl mostró diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) en el rendimiento (Tabla 1). La dosis de 45 mM mostró 62% menor rendimiento respecto a las dosis 0 y 15 mM. Abbas *et al.* (2010) mencionaron que en cultivares de berenjena con la aplicación de 100 mM de NaCl disminuyó el rendimiento de los frutos entre 50 y 60%.

En la interacción de los dos factores en estudio, las dosis de NaCl aplicadas en las plantas bajo invernadero disminuyeron el rendimiento en 75% ($p \leq 0.05$) respecto a la malla sombra (Tabla 1). En este sentido, las mallas negras reducen la cantidad de luz que llega a las plantas (Shahak, 2008), reduce la temperatura del aire y el suelo, lo cual produce menor estrés por calor en las plantas (Ilić y Fallik *et al.*, 2017). El crecimiento y rendimiento de plantas de berenjena está limitado cuando la temperatura es mayor a 30 °C (Adamczewska-Sowińska *et al.*, 2016). Es probable que en invernadero el rendimiento e inicio a cosecha se afectara debido a las altas temperaturas registradas presentando máximas hasta de 47.5 °C.

SPAD

En las plantas cultivadas bajo las estructuras utilizadas, la aplicación de dosis de NaCl y la interacción de los dos factores en estudio no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en unidades SPAD (Tabla 1). Kang *et al.* (2013) mencionaron que en el cultivo de lechuga las unidades SPAD no mostraron diferencias a intensidades de luz de 200, 230, 260 y 290 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Las lecturas SPAD representan el contenido de clorofila de las hojas, la reducción de la clorofila como respuesta al estrés por salinidad reduce el crecimiento y la biomasa seca de las plantas, demostrado en los cultivares de stevia (*Stevia*

rebaudiana) al disminuir las unidades SPAD entre 28 y 33% a dosis de 50 mM (Debnath *et al.*, 2018) y en genotipos de quinoa (*Chenopodium quinoa*) disminuyó alrededor del 34% con dosis de 400 mM de NaCl respecto al testigo (Jaramillo-Roman *et al.*, 2020).

NDVI

Las plantas cultivadas en las estructuras utilizadas mostraron diferencias ($p \leq 0.05$), bajo la malla sombra aumentó el índice en 5% (Tabla 1). Según lo mencionado por Gutiérrez-Soto *et al.* (2011) valores de 0.7-0.8 son indicadores de plantas en mejores condiciones, donde la luz incidente natural es separada de la producida por el instrumento electrónicamente y mide rangos entre -1.0 y 1.0. Leone *et al.* (2007) mencionaron que, en el cultivo de berenjena, las plantas en mejores condiciones presentaron valores de NDVI de 0.82. En este estudio, el cultivo bajo malla sombra mostró el mayor valor del NDVI con 0.66, en comparación con el invernadero (Tabla 1). En otro estudio, el cultivo de trigo, el NDVI mostró un comportamiento inverso con respecto a la radiación; es decir, a mayor incidencia de radiación solar menor NDVI, disminuyó de valores entre 0.82-0.84 a 0.68 (Stocker *et al.*, 2019).

La aplicación de dosis de NaCl y la interacción de los dos factores en estudio no afectaron significativamente ($p \leq 0.05$) el NDVI en las plantas (Tabla 1). El NDVI se considera un indicador confuso del grado de salinidad porque se relaciona también con la biomasa, el área foliar, la cobertura vegetal, el contenido de nitrógeno y clorofila (Zhang *et al.*, 2011). Sin embargo, en berenjenas regadas con agua salina, el testigo mostró valores mayores en 7 y 22% respecto a los tratamientos con 5.72 g y 10.72 g de NaCl, esto indica que la reflectancia espectral puede ser un criterio indirecto efectivo para monitorear los cambios de salinidad/sodicidad del suelo, también cuando la vegetación es moderadamente sensible a la salinidad/sodicidad, como en el caso de las berenjenas (Leone *et al.*, 2007).

Tabla 1. Crecimiento de plantas de berenjena bajo dos estructuras protegidas y dosis de NaCl.

Table 1. Eggplant plant growth under two protected structures and NaCl doses.

		Biomasa seca (g)	Área foliar (cm²)	Rendimiento (g/planta)	Unidades SPAD	NDVI
Estructura protegida (EP)	I	106.73 a	4084.16 b	184.91 b	58.63 a	0.63 b
	MS	87.70 b	4878.91 a	624.16 a	61.06 a	0.66 a
	DMS	13.38	209.73	109.17	2.77	0.02
NaCl (N)	0 mM	121.03 a	5497.9 a	505.76 a	59.58 a	0.65 a
	15 mM	98.38 ab	4366.6 b	530.49 a	60.68 a	0.62 a
	30 mM	89.87 b	4200.0 bc	389.84 ab	58.54 a	0.65 a
	45 mM	79.57 b	3861.6 c	192.07 b	60.58 a	0.65 a
	DMS	25.29	399.62	206.36	5.19	0.04
Interacción (EP*N)	EPI*N0	139.00 a	5049.2 b	315.3 bc	57.61 a	0.62 a
	EPI*N15	111.53 ab	4002.1 d	171.3 c	59.60 a	0.61 a
	EPI*N30	94.70 ab	4128.0 cd	157.5 c	57.83 a	0.64 a
	EPI*N45	78.70 b	3157.4 e	95.5 c	59.47 a	0.64 a
	EPMS*N0	103.80 ab	5946.7 a	696.2 a	61.56 a	0.67 a
	EPMS*N15	85.25 b	4731.1 bc	889.7 a	61.76 a	0.63 a
	EPMS*N30	82.05 b	4272.0 cd	622.1 ab	59.25 a	0.66 a
	EPMS*N45	80.45 b	4565.9 bcd	288.6 bc	61.70 a	0.66 a
	DMS	42.95	682.96	350.37	8.73	0.07
	CV	18.86	6.27	36.98	9.27	7.08

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); EP: estructura protegida; N: dosis de NaCl; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

NO₃⁻ en Pecíolo

Se encontraron diferencias ($p \leq 0.05$) en las plantas cultivadas bajo las estructuras utilizadas, en invernadero fue menor la concentración de NO₃⁻ en el extracto celular del pecíolo en 35% (Figura 1 A). De acuerdo con Fu *et al.* (2017) la intensidad de la luz de 60 a 140 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ disminuyó 40% el nitrato del tejido foliar en plantas de tomate.

Las dosis de 30 y 45 mM de NaCl aplicadas disminuyeron en 34% la concentración de NO₃⁻ en pecíolo ($p \leq 0.05$) respecto a 0 mM de NaCl (Figura 1 B). Caso contrario,

Hannachi y Van Labeke (2018) en la variedad de berenjena Black Beauty, con dosis de 20 y 40 mM no encontraron diferencias en la concentración de nitratos en hojas, sin embargo, con dosis de 80 y 160 mM de NaCl disminuyó 42 y 76% respectivamente. La salinidad influye en la captación y transporte de otros iones, un antagonismo podría ocurrir entre Cl^- y NO_3^- , estos efectos pueden estar implicados en la aparición de trastornos nutricionales en los tejidos vegetales y afectar la calidad de los cultivos (Martínez-Ballesta *et al.*, 2010).

En la interacción de los factores de estudio, las dosis altas en malla sombra de 45 mM y en invernadero 30 y 45 mM disminuyeron 46% la concentración de NO_3^- en el extracto celular de peciolo ($p \leq 0.05$) (Figura 1 C). A mayor intensidad de luz $325 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en invernadero, las dosis más altas de NaCl disminuyeron la concentración de NO_3^- en el peciolo. Al respecto, en hojas de tomate bajo dos intensidades de luz 200 y $650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, el estrés salino de 80 mM de NaCl condujo a una reducción del 8% la concentración de nitrógeno respecto a 0 mM (Zhang *et al.*, 2020). En genotipos de quinoa (*Chenopodium quinoa*) las concentraciones de NO_3^- en las hojas disminuyeron 27% con dosis de 400 mM respecto al testigo (Jaramillo-Roman *et al.*, 2020).

K⁺ en Peciolo

No se observaron diferencias ($p \leq 0.05$) en la concentración de K^+ en las plantas cultivadas bajo las estructuras utilizadas, con la aplicación de dosis de NaCl y en la interacción de los dos factores en estudio (Figura 1 D, E, F). Brenes *et al.* (2020) mencionaron que en hojas de berenjena las dosis de 50, 100, 200 y 150 mM no modifican las concentraciones de K^+ . Caso similar, en berenjena Black Beauty, las dosis de 20, 40 y 80 mM no afectaron la concentración foliar de K^+ (Hannachi y Van Labeke, 2018). La tolerancia de la berenjena a la sal se debe al mantenimiento de los niveles de K^+ con el aumento de Na^+ (Brenes *et al.*, 2020), a un alto costo metabólico (Jaramillo-Roman *et al.*, 2020). Sin embargo, otros estudios en plantas de berenjena mostraron que la concentración de K^+ disminuye según la dosis, con 50 mM disminuyó en 19% (Assaha *et al.*, 2013), 100 mM entre 31 y 40% (Abbas *et al.*, 2010), 150 mM en 15% (Shahbaz *et al.*, 2013) y 160 mM en 43% (Hannachi y Van Labeke, 2018). Además, la intensidad de luz no influyó en la concentración de K^+ pero si la dosis de NaCl, como en el cultivo de tomate con 80

mM de NaCl con intensidades de 200 y 650 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ el K^+ disminuyó en 50% respecto a 0 mM (Zhang *et al.*, 2020). La alta salinidad por NaCl aumenta la salida de K^+ de las raíces a consecuencia de una mayor entrada de Na^+ al perder proteínas de la membrana plasmática como vía de flujo de K^+ , esto genera una mayor fuerza impulsora mediado por las especies reactivas de oxígeno del estrés por NaCl que activan el canal de K^+ (Laohavisit *et al.*, 2013).

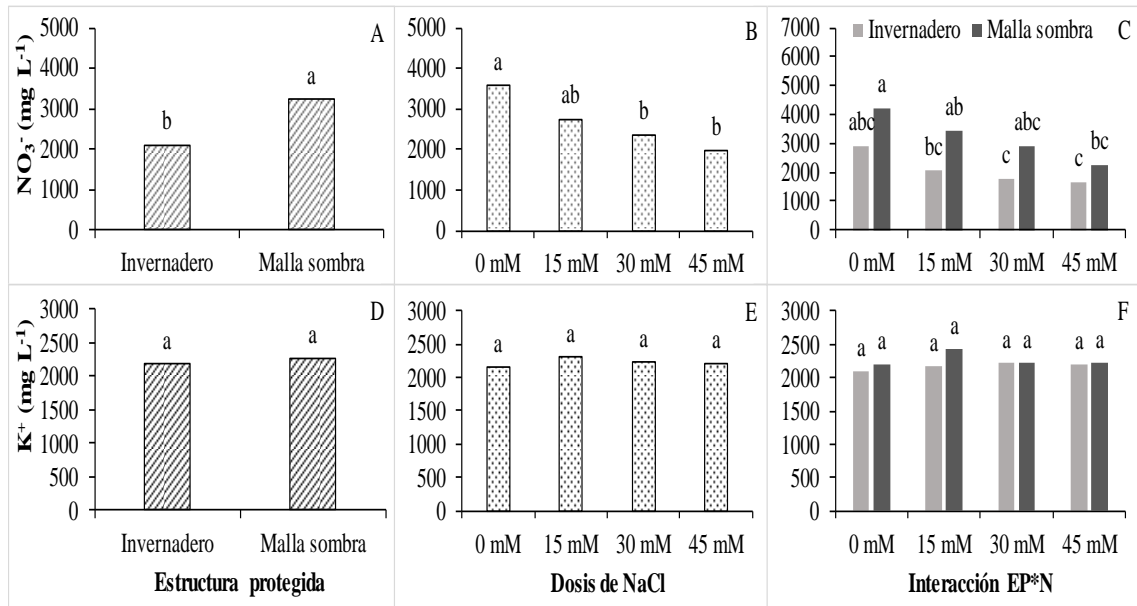


Figura 1. Iones NO_3^- y K^+ en extracto celular de peciolo en plantas de berenjena bajo estructuras protegidas (A, D), dosis de NaCl (B, E) e interacción estructura protegida y dosis de NaCl (C, F). Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 1. NO_3^- and K^+ ions in petiole cellular extract of eggplant plants under protected structures (A, D), NaCl dose (B, E) and interaction with protected structure and NaCl dose (C, F). Means with the same letters are not statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

Ca^{2+} en Peciolo

No se encontraron diferencias ($p \leq 0.05$) en las plantas cultivadas bajo las estructuras (Figura 2 A), a pesar que en invernadero se presentó la mayor temperatura. En un estudio en lechugas cultivadas a 33 °C, la concentración foliar de calcio disminuyó en un 13% respecto a las plantas cultivadas a 25 °C, a temperaturas más bajas se mejora el desarrollo de las raíces y se facilita la absorción y asimilación de nutrientes (Sublett *et al.*, 2018).

Con las dosis 30 y 45 mM de NaCl aplicadas, aumentó en 40% la concentración de Ca^{2+} en peciolo ($p \leq 0.05$) comparado con 0 mM (Figura 2 B). En berenjena Black Beauty las dosis de 20, 40 y 80 mM no afectaron la concentración foliar de Ca^{2+} (Hannachi y Van Labeke, 2018). En contraste, en cultivares de berenjena con 100 mM disminuyó alrededor de 47% (Abbas *et al.*, 2010), con 150 mM en 9% (Shahbaz *et al.*, 2013) y con dosis de 160 mM en 30% (Hannachi y Van Labeke, 2018). En este sentido, Martínez-Ballesta *et al.* (2010) mencionaron que la salinidad por NaCl reduce la absorción, transporte y acumulación de Ca^{2+} en las plantas.

El aumento en la concentración de Ca^{2+} podría explicar el efecto no significativo en K^+ (Fig 1 E y F). Shabala *et al.* (2006) mencionaron que, en condiciones salinas, el Ca^{2+} evita la pérdida de K^+ del tejido foliar, cuando se aplican 10 mM Ca^{2+} y 50 mM Na^+ juntos a los protoplastos de las raíces, las corrientes de salida de K^+ desaparecieron, por lo tanto, el Ca^{2+} puede desactivar la pérdida de K^+ de la raíz. El efecto de mejora del Ca^{2+} y algunos cationes divalentes (Mg^{2+} , Zn^{2+}) sobre la toxicidad del Na^+ puede explicarse por el bloqueo del influjo tóxico de Na^+ a través de los canales catiónicos no selectivos (Demidchik y Tester, 2002).

En la interacción de los factores de estudio, en las plantas bajo malla sombra con dosis de 45 mM aumentó la concentración de calcio en el extracto celular de peciolo en 45% ($p \leq 0.05$) en comparación con 0 y 15 mM en malla sombra y 0 mM en invernadero (Figura 2 C). En cultivares de stevia las concentraciones de Ca^{2+} disminuyeron al aumentar las dosis de 50 a 300 mM de NaCl (Debnath *et al.*, 2018), en otro estudio, en cultivares de albahaca dosis de 30 a 200 mM no afectaron la concentración de Ca^{2+} (Scagel *et al.*, 2019).

Na^+ en Peciolo

No se encontraron diferencias ($p \leq 0.05$) en las plantas cultivadas en las estructuras (Figura 2 D). Bajo dos intensidades de luz 200 y 650 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ la concentración de Na^+ en hojas de tomate no mostró diferencias (Zhang *et al.*, 2020).

Las dosis de NaCl mostraron diferencias ($p \leq 0.05$), las dosis más altas 30 y 45 mM fueron mayores en 78% respecto a los demás tratamientos (Figura 2 E). En variedades de berenjena, con 40 mM no se encontraron diferencias en la concentración de Na^+ , sin

embargo, en Black Beauty al aumentar la dosis a 80 y 160 mM se acumuló un 78% (Hannachi y Van Labeke, 2018). En cultivares de berenjena con 150 mM se acumuló Na^+ entre un 40 y 50% (Shahbaz *et al.*, 2013). En especies de berenjena con dosis a partir de 50 a 300 mM la concentración de Na^+ en las hojas aumentó desde un 50 a 88% (Brenes *et al.*, 2020).

En la interacción de los factores de estudio, en invernadero con la dosis más alta se aumentó la concentración de sodio en peciolo en 89% ($p \leq 0.05$) en comparación con 0 mM en invernadero, 0 y 15 mM en malla sombra (Figura 2 F). En diversos cultivos se puede ver respuesta similar en el aumento de Na^+ en hojas con la aplicación de NaCl. En tomate 98% con 80 mM bajo dos intensidades de luz 200 y 650 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con respecto a 0 mM (Zhang *et al.*, 2020). En cultivares de tomate alrededor de 95% con 35 y 70 mM (Romero-Aranda *et al.*, 2001), en cultivares de berenjena hasta un 93% con dosis de 50 mM (Assaha *et al.*, 2013) y alrededor de 56% con 100 mM (Abbas *et al.*, 2010). Cuando el NaCl es abundante en la zona de las raíces, la corriente de transpiración transporta los iones de Na^+ y Cl^- a las hojas, donde se acumulan y, en ocasiones, alcanzan niveles tóxicos (Scagel *et al.*, 2019). Las plantas mediante adaptaciones fisiológicas y bioquímicas pueden lograr tolerancia al estrés salino, como la síntesis de compuestos orgánicos y la acumulación de iones inorgánicos donde la mayoría acumulan Na^+ y Cl^- en los tejidos, lo que produce toxicidad (Debnath *et al.*, 2018).

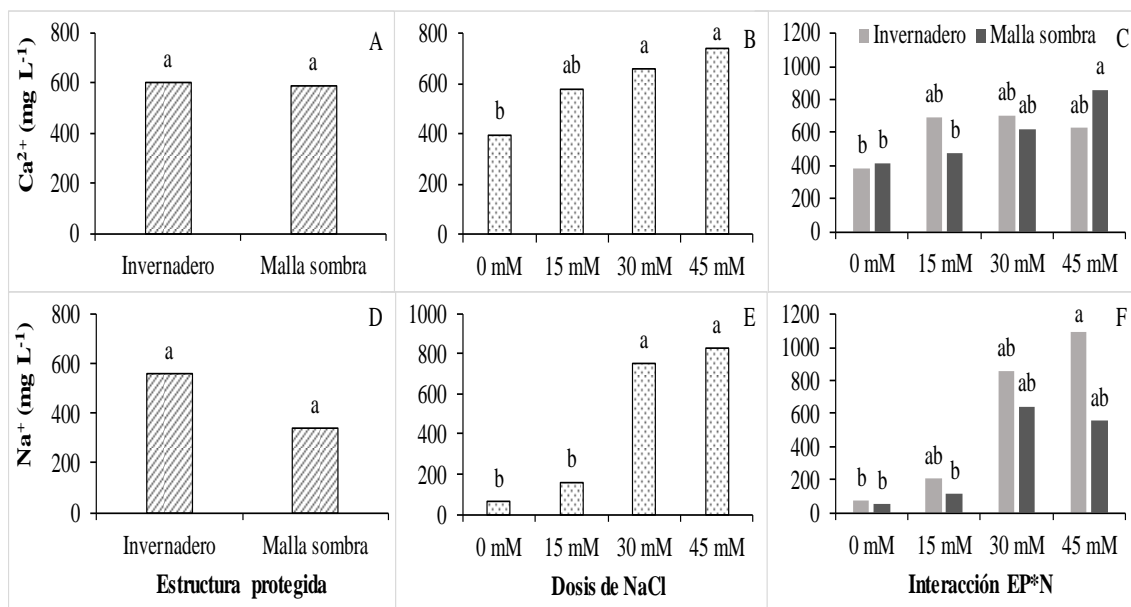


Figura 2. Iones Ca²⁺ y Na⁺ en extracto celular de peciolo en plantas de berenjena bajo estructuras protegidas (A, D), dosis de NaCl (B, E) e interacción estructura protegida y dosis de NaCl (C, F). Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 2. Ca²⁺ and Na⁺ ions in petiole cellular extract of eggplant plants under protected structures (A, D), NaCl dose (B, E) and interaction with protected structure and NaCl dose (C, F). Means with the same letters are not statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Las condiciones ambientales en la estructura inducen cambios en las plantas de berenjena, la alta temperatura y radiación en invernadero disminuyeron el rendimiento, el área foliar, el NDVI y la concentración de NO_3^- . Las plantas en la malla sombra al reducir la temperatura y radiación, mostraron menor estrés y en general las variables no se afectaron, solamente disminuyó la biomasa.

El estrés salino disminuyó el crecimiento de las plantas e influyó en la captación de iones, con las dosis de NaCl aplicadas a partir de 15 mM disminuyó la biomasa y el área foliar. Con 30 y 45 mM disminuyó el rendimiento y la concentración de NO_3^- y se vio un aumento en la concentración de Ca^{2+} . Las dosis de NaCl no influyeron en el NDVI, unidades SPAD y concentración de K^+ .

Al aplicar NaCl en invernadero aumenta la biomasa, la concentración de Ca^{2+} y Na^+ . En la malla sombra no se afectó el rendimiento y aumentó la concentración de NO_3^- y Ca^{2+} . El cultivar berenjenas bajo malla sombra con estrés salino reduce los efectos negativos en el crecimiento y rendimiento de berenjena.

LITERATURA CITADA

- Abbas W, Ashraf M, Akram NA (2010). Alleviation of salt-induced adverse effects in eggplant (*Solanum melongena* L.) by glycinebetaine and sugarbeet extracts. *Scientia Horticulturae*. 125(3): 188-195. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.04.008>.
- Adamczewska-Sowińska K, Krygier M, Turczuk J (2016). The yield of eggplant depending on climate conditions and mulching. *Folia Horticulturae*. 28(1): 19-24. <https://doi.org/10.1515/fhort-2016-0003>.
- Arif Y, Singh P, Siddiqui H, Bajguz A, Hayat S (2020). Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*. 156: 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.08.042>.
- Assaha DV, Ueda A, Saneoka H (2013). Comparison of growth and mineral accumulation of two solanaceous species, *Solanum scabrum* Mill. (huckleberry) and *S. melongena* L.(eggplant), under salinity stress. *Soil science and plant nutrition*. 59(6): 912-920. <https://doi.org/10.1080/00380768.2013.858300>.
- Azcón-Bieto J, Fleck I, Aranda X, Gómez-Casanovas N (2008). Fotosíntesis, Factores ambientales y Cambio climático. In: Azcón-Bieto, J. T. and Talon, M. M. (Ed.). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Editorial McGraw-Hill Interamericana. Madrid, España, pp.247-264.
- Bacha H, Tekaya M, Drine S, Guasmi F, Touil L, Enneb H, Triki T, Cheour F, Ferchichi A (2017). Impact of salt stress on morpho-physiological and biochemical parameters of *Solanum lycopersicum* cv. Microtom leaves. *South African Journal of Botany*. 108: 364-369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2016.08.018>.
- Brenes M, Solana A, Boscaiu M, Fita A, Vicente O, Calatayud A, Prohens J, Plazas M (2020). Physiological and biochemical responses to salt stress in cultivated eggplant (*Solanum melongena* L.) and in *S. insanum* L., a close wild relative. *Agronomy*. 10(5): 651. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050651>.
- Debnath M, Ashwath N, Hill CB, Callahan DL, Dias DA, Jayasinghe NS, Midmore DJ, Roessner U (2018). Comparative metabolic and ionomic profiling of two cultivars of *Stevia rebaudiana* Bert. (Bertoni) grown under salinity stress. *Plant physiology and biochemistry*. 129: 56-70. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.001>.
- Demidchik V, Tester M (2002). Sodium fluxes through nonselective cation channels in the plasma membrane of protoplasts from *Arabidopsis* roots. *Plant physiology*. 128(2): 379-387. <https://doi.org/10.1104/pp.010524>.
- Fu Y, Li H, Yu J, Liu H, Cao Z, Manukovsky NS, Liu H (2017). Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics

- and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. youmaicai). *Scientia horticulturae*. 214: 51-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.020>.
- Gutiérrez-Soto MV, Cadet-Piedra E, Rodríguez-Montero W, Araya-Alfaro JM (2011). El GreenSeeker TM y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía mesoamericana*. 22(2): 397-403.
- Gürbüz N, Uluişik S, Frary A, Frary A, Doğanlar S (2018). Health benefits and bioactive compounds of eggplant. *Food chemistry*. 268: 602-610. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.093>.
- Hannachi S, Van Labeke MC (2018). Salt stress affects germination, seedling growth and physiological responses differentially in eggplant cultivars (*Solanum melongena* L.). *Scientia Horticulturae*. 228: 56-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.002>.
- Hatamnia AA, Abbaspour N, Darvishzadeh R, Rahmani F, Heidari R (2013). Effect of salt stress on growth, ion content and photosynthesis of two oriental tobacco (*Nicotiana tabacum*) cultivars. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 6: 757–761.
- Ilić ZS, Fallik E (2017). Light quality manipulation improves vegetable quality at harvest and postharvest: A review. *Environmental and Experimental Botany*. 139: 79-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.006>.
- Jaramillo-Roman V, den Toom LA, Castro Gamiz C, van der Pijl N, Visser RG, van Loo EN, van der Linden CG (2020). Differential responses to salt stress in ion dynamics, growth and seed yield of European quinoa varieties. *Environmental and Experimental Botany*. 104146. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104146>.
- Kang JH, KrishnaKumar S, Atulba SLS, Jeong BR, Hwang SJ (2013). Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 54(6): 501-509. <https://doi.org/10.1007/s13580-013-0109-8>.
- Kyriacou MC, Roupheal Y, Di Gioia F, Kyrtatzis A, Serio F, Renna M, De Pascale M, Santamaria P (2016). Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. *Trends in Food Science & Technology*. 57: 103-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.005>.
- Laohavisit A, Richards SL, Shabala L, Chen C, Colaço RD, Swarbreck SM, Shaw E, Dark A, Shabala S, Shang Z, Davies JM (2013). Salinity-induced calcium signaling and root adaptation in Arabidopsis require the calcium regulatory protein annexin1. *Plant physiology*. 163(1): 253-262. <https://doi.org/10.1104/pp.113.217810>.
- Lara-Izaguirre AY, Rojas-Velázquez AN, Alia-Tejacal I, Alcalá-Jáuregui JA (2022). Sodium chloride on bioactive compounds of eggplant (*Solanum melongena* L.) grown in hydroponics under two protected structures. *Agrociencia*. 56(2): 207-232. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i2.2732>

- Leone AP, Menenti M, Buondonno A, Letizia A, Maffei C, Sorrentino G (2007). A field experiment on spectrometry of crop response to soil salinity. *Agricultural water management*. 89(1-2): 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.12.004>.
- Martínez-Ballesta MC, Dominguez-Perles R, Moreno DA, Muries B, Alcaraz-López C, Bastías E, García-Viguera C, Carvajal M (2010). Minerals in plant food: effect of agricultural practices and role in human health. A review. *Agronomy for sustainable development*. 30(2): 295-309. <https://doi.org/10.1051/agro/2009022>.
- Munns R, Tester M (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*. 59: 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>.
- Oh MM, Carey EE, Rajashekar CB (2009). Environmental stresses induce health-promoting phytochemicals in lettuce. *Plant Physiology and Biochemistry*. 47: 578-583. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.02.008>.
- Priyadarshini N, Shishira T, Singh K, Dsouza M (2016). Biochemical response of *Solanum Melongena* to salinity stress in relation to stress factors. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*. 6: 756-766.
- Romero-Aranda R, Soria T, Cuartero J (2001). Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Science*. 160(2): 265-272. doi: 10.1016/s0168-9452(00)00388-5.
- Rouphael Y, Kyriacou MC, Petropoulos SA, De Pascale S, Colla G (2018). Improving vegetable quality in controlled environments. *Scientia Horticulturae*. 234: 275-289. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.033>.
- Rubio JS, Garcia-Sanchez F, Rubio F, Martinez V (2009). Yield, blossom-end rot incidence, and fruit quality in pepper plants under moderate salinity are affected by K⁺ and Ca²⁺ fertilization. *Scientia Horticulturae*. 119(2): 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.07.009>.
- Savvas D, Lenz F (2000). Effects of NaCl or nutrient-induced salinity on growth, yield, and composition of eggplants grown in rockwool. *Scientia Horticulturae*. 84: 37-47. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00117-X).
- Shabala S, Demidchik V, Shabala L, Cuin TA, Smith SJ, Miller AJ, Davies JM, Newman IA (2006). Extracellular Ca²⁺ ameliorates NaCl-induced K⁺ loss from Arabidopsis root and leaf cells by controlling plasma membrane K⁺-permeable channels. *Plant physiology*. 141(4): 1653-1665. <https://doi.org/10.1104/pp.106.082388>.
- Shahak Y (2008). Photo-Selective Netting for Improved Performance of Horticultural Crops. A Review of Ornamental and Vegetable Studies Carried Out in Israel. *Acta Horticulturae*. 770: 161-168. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.18>.
- Stocker V, de Souza EG, Johann JA, Beneduzzi HM, e Silva FO (2019). Effect of height, tilt and twist angles of an active reflectance sensor on NDVI measurements. *Engenharia Agrícola*. 39(SPE): 96-108. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep96-108/2019>.

- Scagel CF, Lee J, Mitchell JN (2019). Salinity from NaCl changes the nutrient and polyphenolic composition of basil leaves. *Industrial crops and products*. 127: 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.048>.
- Shahbaz M, Mushtaq Z, Andaz F, Masood A (2013). Does proline application ameliorate adverse effects of salt stress on growth, ions and photosynthetic ability of eggplant (*Solanum melongena* L.)?. *Scientia Horticulturae*. 164: 507-511. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2013.10.001>.
- Steiner AA (1984). The Universal Nutrient Solution. Sixth International Congress on Soilless Culture, Wageningen, Netherlands. ISOSC Proceedings of Lunteren, pp. 633-650.
- Sublett WL, Barickman TC, Sams CE (2018). Effects of elevated temperature and potassium on biomass and quality of dark red ‘Lollo Rosso’ lettuce. *Horticulturae*, 4(2): 11. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4020011>.
- Uzun S (2007). Effect of light and temperature on the phenology and maturation of the fruit of eggplant (*Solanum melongena*) grown in greenhouses. *New Zealand journal of crop and horticultural science*. 35(1): 51-59. <https://doi.org/10.1080/01140670709510167>.
- Ünlükara A, Kurunc A, Kesmez GD, Yurtseven E, Suarez DL (2010). Effects of salinity on eggplant (*Solanum melongena* L.) growth and evapotranspiration. *Irrigation and Drainage. The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*. 59(2): 203-214. <https://doi.org/10.1002/ird.453>.
- Vázquez-Hernández MC, Parola-Contreras I, Montoya-Gómez LM, Torres-Pacheco I, Schwarz D, Guevara-González RG (2019). Eustressors: Chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production. *Scientia Horticulturae*. 250: 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.053>.
- Zhang TT, Zeng SL, Gao Y, Ouyang ZT, Li B, Fang CM, Zhao B (2011). Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity. *Ecological Indicators*. 11(6): 1552-1562. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.025>.
- Zhang Y, Kaiser E, Marcelis LF, Yang Q, Li T (2020). Salt stress and fluctuating light have separate effects on photosynthetic acclimation, but interactively affect biomass. *Plant, Cell & Environment*. 43(9): 2192-2206. <https://doi.org/10.1111/pce.13810>.

CAPÍTULO IV

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

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

Manuscrito enviado: Revista Fitotecnia Mexicana

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 en la dieta. El uso de yodo en la biofortificación de los cultivos mejora la calidad nutricional de los alimentos. En el presente trabajo se evaluó el efecto del yoduro de potasio (KI) en el cultivo de berenjena, en 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 8 unidades experimentales, en un diseño completamente al azar, se analizó mediante un ANOVA y una comparación de medias con Tukey. Las variables evaluadas fueron altura, 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, número de hojas, biomasa aérea y rendimiento. El uso de yodo en las plantas aumentó el área foliar con dosis de 60 y 90 μM . En el fruto dosis de 30 y 60 μM disminuyeron los SST y la concentración de fenoles con 90 μM . Dosis de 60 y 90 μM aumentaron 34% la actividad antioxidante y 25% el contenido de Zn y 34% de Mn con 90 μM . La concentración de yodo aumentó 64 a 90% con todas las dosis de KI utilizadas. Al utilizar yodo como biofortificador en el cultivo de 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., biofortificación, yodo, actividad antioxidante, compuestos bioactivos

SUMMARY

Iodine (I) is an essential element in human health, its deficiency in food leads to insufficient intake of this element in the diet. The use of iodine in crop biofortification improves the nutritional quality of food. This study evaluated the effect of potassium iodide (KI) on eggplant culture, iodine concentration and antioxidant activity in fruits. Eggplant plants were grown at doses of 0, 30, 60 and 90 μM KI. The variables evaluated were height, leaf area, number of leaves, aerial biomass, yield and firmness of the fruit. Total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), vitamin C, total flavonoids, total phenols, antioxidant activity and mineral concentration Mg, Fe, Zn, Mn and I were evaluated in the fruits. KI doses did not affect height, leaf number, aerial biomass and yield. The use of iodine in plants increased leaf area with doses of 60 and 90 μM . In the fruit doses of 30 and 60 μM decreased SST and phenols concentration with 90 μM . Doses of 60 and 90 μM increased antioxidant activity 34% and Zn content 25% and 34% Mn with 90 μM . The iodine concentration increased 64 to 90% with all doses of KI used. Using iodine as a biofortifier in eggplant cultivation improves nutritional quality, because it increases its concentration in the fruits, without affecting the growth of the crop.

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

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). El uso de fertilizantes minerales es aplicado para biofortificar debido a que mejora 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 cultivares toleran un rango específico de concentración de yodo que permite la biofortificación y cantidades más altas causan toxicidad (Dávila-Rangel *et al.*, 2019). El yodo mejora en los frutos 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 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 incluidos fenólicos, 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 de berenjena (Bana *et al.*, 2022). De acuerdo con lo anterior es importante determinar las dosis de aplicación de yodo como biofortificador de frutos de berenjena, mejorar la calidad nutricional y compuestos bioactivos, sin provocar efectos tóxicos en las plantas. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del yodo en el cultivo de berenjena, en la biofortificación y actividad antioxidante y minerales de 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 Luís Potosí, ubicada en San Luís Potosí, México. Se utilizó un invernadero tipo túnel de dimensiones 5 x 9 m. El ciclo de cultivo fue verano-otoño (195 días junio a diciembre), con temperatura media de 20.0 °C y una luminosidad media de 394.8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, medido con un registrador HOBO (Onset UA-002-08 Pendant Temperature/Light Data Logger).

Material genético y manejo del experimento

Se utilizaron semillas de berenjena de la variedad “Black Beauty” (Caloro[®]) como material vegetal 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 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 y H_3PO_4 . 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 con H_3PO_4 a 5.5.

Diseño y unidad experimental

El experimento se realizó en un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos 0, 30, 60 y 90 μM de KI. La unidad experimental fue una planta y se establecieron 8 repeticiones por tratamiento.

Tratamientos

Al inicio de la floración (91 ddt) se aplicaron los tratamientos de KI (Karal[®]) a la solución Steiner en cuatro dosis: 0 como testigo, 30, 60 y 90 μM .

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, USA). El número de hojas se contó de forma visual. Para el peso seco la parte aérea (tallos y hojas) se utilizó a 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, 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, EUA), el rendimiento se reportó en g planta⁻¹.

Análisis de los frutos

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

Vitamina C

El ácido ascórbico se determinó de acuerdo al 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 minutos a 4 °C. Se midió la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (GENESYS 10S, Thermo Scientific™). La curva de calibración se hizo utilizando ácido ascórbico (AA) y los resultados se reportan en $\mu\text{g AA } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso fresco.

Flavonoides totales

Se determinaron de acuerdo con el método de tricloruro de aluminio (AlCl_3) de acuerdo a 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 realizó una curva estándar de quercetina y los resultados se expresaron en mg de quercetina (EQ) 100 g^{-1} de peso fresco.

Preparación de extractos para fenoles totales y actividad antioxidante

Se preparó el extracto al homogenizar 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 6000 rpm por 15 minutos.

Fenoles totales

Se determinaron con el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu, como lo describen Waterman & Mole (1994), con algunas modificaciones. Se midió la absorbancia a 760 nm. La curva estándar se realizó usando ácido gálico y los resultados se expresan en mg de ácido gálico (EAG) 100 g^{-1} de peso fresco.

Actividad antioxidante ABTS

Mediante el método de ABTS con algunas modificaciones se realizó de acuerdo a Re *et al.* (1999). 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 al 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 TM, USA).

Análisis Estadístico

Con los datos obtenidos se realizó un 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 Inc., 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura, Área Foliar, Número de Hojas, Biomasa Seca Aérea y Rendimiento

Con las dosis de KI aplicadas no se mostraron diferencias estadísticas significativas en altura, número de hojas y biomasa seca (Cuadro 1). El efecto del 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 $\mu\text{g L}^{-1}$ de KI no afectó la biomasa en lechuga (Voogt *et al.*, 2010). Dosis de 60 μM de KI respecto al testigo redujo 22% la biomasa aérea en lechuga (Blasco *et al.*, 2008). Con dosis de 10 μM de yodo en *Arabidopsis* aumentó 22% la biomasa, los efectos positivos del yodo sobre el crecimiento se perdieron a 30 μM , esto sugiere que esta concentración de I^- puede estar por encima del umbral de toxicidad (Kiferle *et al.*, 2021).

Las dosis de KI mostraron un aumento en el área foliar de la berenjena, la dosis de 90 μM aumentó 16% en comparación con 30 μM y esta mostró 15% mayor al tratamiento sin aplicación de KI, la dosis de 60 μM fue igual a las demás dosis aplicadas con KI (Cuadro 1). En albahaca el área foliar no se afectó con dosis de 10 μM de KI y en lechuga el área foliar disminuyó 20 a 59% respecto al testigo (Puccinelli *et al.*, 2021).

Algunas variables foliares no tuvieron un efecto significativo entre tratamientos en las plantas de berenjena (Cuadro 1), sin embargo, con las dosis de KI se mostraron efectos, probablemente síntomas de fitotoxicidad ya que se observaron clorosis foliar y quemaduras de hojas inferiores que posteriormente se caían conforme se aumentaba la concentración de yodo. Coincidiendo estos efectos con los reportados en tomate por Landini *et al.* (2011). El efecto negativo del yodo en las plantas es debido a que se acumula 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 dependiendo de la concentración de 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 no se mostraron diferencias estadísticas significativas en 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 y desarrollo vegetativo y reproductivo (Landini *et al.*, 2011). En lechuga no se mostraron 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).

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

	Altura	Área foliar	Núm. de hojas	Biomasa seca aérea	Rendimiento
	cm	cm^2		g	g/planta
0 μM KI	80.09 a	306.10 c	61.00 a	114.45 a	27.86 a
30 μM KI	77.48 a	360.12 b	57.80 a	117.22 a	27.30 a
60 μM KI	80.93 a	399.92 ab	61.80 a	96.70 a	27.23 a
90 μM KI	81.39 a	429.53 a	61.00 a	110.57 a	27.04 a
DSH	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 no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). *: significancia estadística al 5%; **: significancia estadística al 1%; ns: no significativo; CV: coeficiente de variación; DSH: diferencia significativa honesta.

Firmeza, Sólidos Solubles Totales y Acidez Titulable

La aplicación de KI en las plantas de berenjena aumentó la firmeza de los frutos hasta en un 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 fueron iguales estadísticamente en el contenido de sólidos solubles totales, sin embargo, la aplicación de 30 μM disminuyó 27% los SST comparado con el testigo 0 μM y las dosis 30 y 60 μM comparadas con la 90 μM redujeron 26% los SST (Figura 1 B). En frutos de tomate no se observó efecto en $^{\circ}\text{Brix}$ con dosis de 7.88 μM de KI respecto al testigo, sin embargo, con dosis de 7.88 μM KIO_3 disminuyó en 27% (Smoleń *et al.*, 2015). En tomate, las dosis de KI y KIO_3 redujeron el contenido de azúcar, al disminuir $^{\circ}\text{Brix}$ progresivamente con el aumento de las dosis, de 1 a 5 mM de KI

disminuyeron en 13 a 26% y con dosis de 0.5 a 2 mM de KIO_3 en 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 respecto al testigo. La cantidad correcta de yodo mejora la calidad de los frutos incrementa sólidos solubles y reduce la acidez (Li *et al.*, 2017).

Con las dosis de KI aplicadas no se mostraron diferencias estadísticas significativas en acidez titulable (Figura 1 C). En frutos de tomate se observó una disminución de 10% en acidez titulable con dosis de 7.88 μM de KI y de 5% con KIO_3 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 18%, y con la dosis de 1.0 mg L^{-1} disminuyó en 28 % respecto al testigo, lo que muestra que la aplicación de yodo restringe la síntesis de ácidos orgánicos (Li *et al.*, 2017).

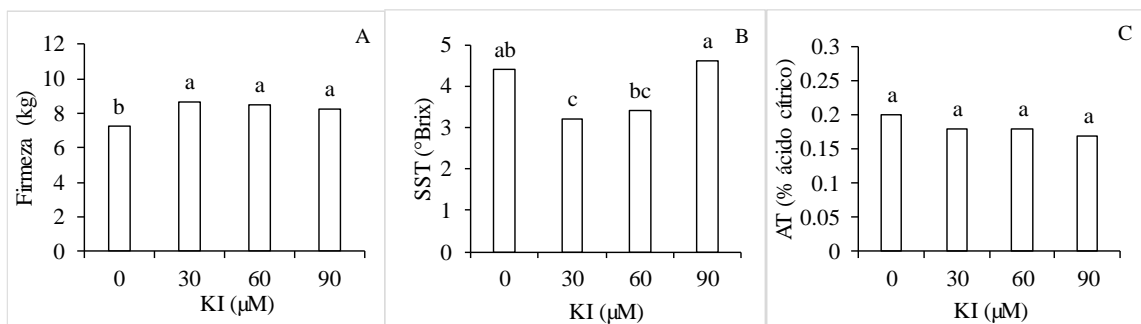


Figura 1. Efecto de dosis de KI en A) Firmeza, B) Sólidos solubles totales y C) Acidez titulable en frutos de berenjena. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).

Vitamina C, Flavonoides Totales, Fenoles Totales y Actividad Antioxidante

Con las dosis de KI aplicadas no se mostraron diferencias estadísticas significativas en la concentración de vitamina C (ácido ascórbico) (Figura 2 A). En frutos de pimiento Li *et al.* (2017) mencionan que a medida que la concentración de yodo aumentó, el contenido de ácido ascórbico en frutos se mostró igual 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%. De igual manera Smoleń *et al.* (2015) observaron un aumento del 10% en la concentración ácido ascórbico con dosis de 7.88 μM de KI y de KIO_3 en frutos de tomate respecto al testigo. En lechuga dosis de 10 μM de KIO_3 no mostraron diferencias en vitamina C en comparación con el testigo sin aplicación de yodo (Smoleń *et al.*, 2022).

Con las dosis de KI aplicadas no se mostraron diferencias estadísticas significativas en flavonoides totales (Figura 2 B). En plantas de tomate dosis de 7.88 μM de KI no influyó en los flavonoides en los frutos (Smolén *et al.*, 2015). En lechuga los flavonoides aumentaron en 67 a 90% con dosis de 10 a 80 μM de KI respecto al testigo (Blasco *et al.*, 2008).

Dosis de 90 μM de KI disminuyó en 45% los fenoles totales en comparación con las demás dosis (Figura 2 C). Se observó un aumento en frutos de tomate del 6% en los compuestos fenólicos con dosis de 7.88 μM de KI y de KIO_3 respecto al testigo (Smoleń *et al.*, 2015). En albahaca agregar KI en dosis de 10 μM aumentó en 11% comparado 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). Dosis altas de KI en el cultivo de berenjena decrecen el contenido fenólico en los frutos y esto reduce la prevención en la formación de especies reactivas de oxígeno y esto disminuiría los efectos benéficos de este cultivo en la salud humana.

La aplicación de dosis 60 y 90 μM de KI aumentaron en 34% la actividad antioxidante en comparación con la dosis 0 y 30 μM (Figura 2 D). En frutos de tomate la dosis de 5 mM de KI, aumentó la actividad antioxidante en 42% respecto al testigo, en dosis más bajas no se detectaron diferencias, esto indica que en los frutos el yodo por encima de un cierto umbral podría desencadenar una respuesta antioxidante contra el estrés causado por este ion (Kiferle *et al.*, 2013). En plantas de tomate la dosis de 7.88 μM de KI no influyó en la actividad antioxidante de los frutos (Smolén *et al.*, 2015). En lechuga la capacidad antioxidante fue mayor con dosis de 10 μM KI en 8 a 13% respecto al testigo (Puccinelli *et al.*, 2021). En este caso, al usar dosis altas de KI en el cultivo de berenjena aumenta la actividad antioxidante en los frutos, el agregar esta hortaliza a la dieta podría contribuir a prevenir enfermedades en los consumidores relacionadas con el estrés oxidativo.

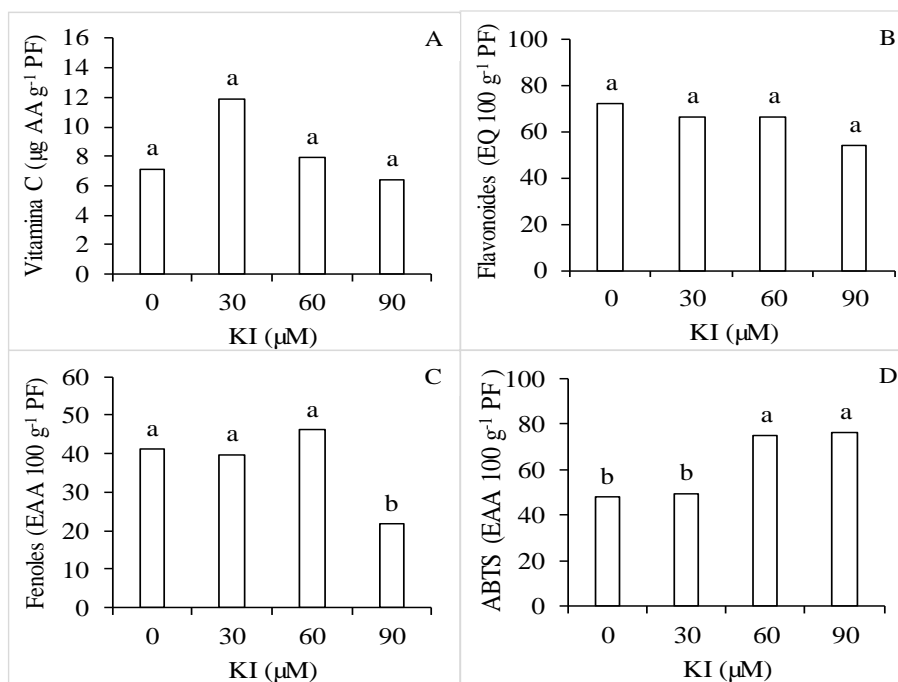


Figura 2. Efecto de dosis de KI en A) Vitamina C, B) Flavonoides, C) Fenoles y D) Actividad antioxidante en frutos de berenjena. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).

Contenido de Minerales Mg, Fe, Zn y Mn en los Frutos

La aplicación de 90 μM de KI aumentó en 16% el contenido de Mg (Cuadro 2) que el tratamiento 30 μM y los demás tratamientos fueron iguales estadísticamente. Dosis de 0.5 mg L⁻¹ de KI en frutos de tomate aumentó las concentraciones de Mg entre 11 y 21% dependiendo del tipo de suelo (Dobosy *et al.*, 2020b). Con la aplicación de yodo en 0.5 mg L⁻¹ en tubérculos de papa las concentraciones de Mg disminuyeron 73 a 78% y en zanahoria disminuyó 34% (Dobosy *et al.*, 2020a).

No se mostraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de Fe en los frutos de berenjena (Cuadro 2). En frutos de tomate con dosis de 0.1 mg L⁻¹ de yodo disminuye el contenido de Fe de 25 a 58% y con 0.5 mg L⁻¹ de yodo la disminución de Fe es 60 y 63%. En col disminuyó de 4 a 22% la concentración de Fe con dosis de 0.5 mg L⁻¹ y con dosis bajas de 0.1 mg L⁻¹ aumenta 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 IO₃⁻ 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).

El contenido de Zn (Cuadro 2) aumentó en 25% con dosis de 90 μM de KI comparado con el 0 y 30 μM de KI. En frutos de tomate, dosis de 0.5 mg L^{-1} de KI aumentó 25 a 39% de Zn dependiendo del tipo de suelo (Dobosy *et al.*, 2020b). Con la aplicación de yodo en 0.5 mg L^{-1} en papa no mostró diferencias en las concentraciones de Zn 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 (Blasco *et al.*, 2012).

El contenido de Mn aumentó en 34% en los frutos con la aplicación de 90 μM de KI comparado con el tratamiento sin yodo (Cuadro 2). El tratamiento 60 μM mostró 26% mayor contenido de Mn que 30 μM de KI. Sin embargo, el 60 μM de KI no mostró diferencias con el 0 y el 90 μM de KI. En frutos de tomate con dosis de 0.1 mg L^{-1} disminuyó entre 11 a 22% el contenido de Mn 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} y en zanahoria aumentó en 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 (Blasco *et al.*, 2012).

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

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

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). *: significancia estadística al 5%; **: significancia estadística al 1%; ns: no significativo; CV: coeficiente de variación; DSH: diferencia significativa honesta.

Contenido de Yodo en los Frutos

El contenido de I⁻ en los frutos aumentó en 90% con dosis 60 y 90 μM y en 64% con dosis de 30 μM de KI en comparación con el testigo (Figura 3). En los trabajos 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 frutos de tomate con dosis de 1 a 5 mM de KI aumentó 96 a 99% y con dosis de 0.5 a 2 mM de KIO₃ en 88 a 95% (Kiferle *et al.*, 2013), con dosis de 5 a 20 mM de KI en 84 a 93% (Landini *et al.*, 2011) y con dosis de 7.88 μM de KI y de KIO₃ en 85 y 75% (Smoleń *et al.*, 2015). En frutos de pimiento aumentó 83% con dosis de 0.25 a 0.50 mg L⁻¹ (Li *et al.*, 2017). En lechuga dosis de 10 μM de KI aumentó la concentración de yodo de 5 a 7 veces (Puccinelli *et al.*, 2021), con dosis de 10 a 120 μM de KI en 97 a 99%, de 10 a 80 μM de KIO₃ 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 KIO₃ 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 éste elemento en la dieta es de importancia debido a su participación en las hormonas tiroideas y para la disminución de los trastornos por deficiencia de yodo en la población humana.

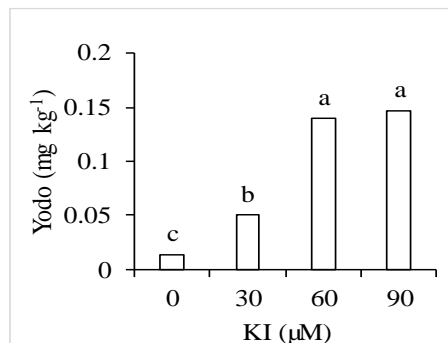


Figura 3. Concentración de yodo en frutos de berenjena con aplicación de KI. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).

CONCLUSIONES

Las dosis de yoduro de potasio utilizadas aumentan el contenido de yodo en los frutos y el usar 60 y 90 μM aumenta la actividad antioxidante y minerales. Sin afectar el crecimiento y rendimiento. 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. Esto sin afectar la concentración de Fe y compuestos bioactivos como vitamina C y flavonoides. Esto podría ser benéfico para la salud en la población humana, ya que disminuye las deficiencias de yodo y a la vez previene enfermedades causadas por el daño celular oxidativo.

LITERATURA CITADA

- AOAC (1990) Official Methods and Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Helrich, K. (ed.). 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 principaux constituants. *Journal Pharmacie Belgique* 49:462-468.
- Bana R. S., G. S. Jat, M. Grover, S. D. Bamboriya, D. Singh, R. Bansal, A. K. Choudhary, V. Kumar, A. M. Laing, S. Godara, R. C. Bana, H. Kumar, B. R. Kuri, A. Yadav and T. Singh (2022) Foliar nutrient supplementation with micronutrient-embedded fertilizer increases biofortification, soil biological activity and productivity of eggplant. *Scientific Reports* 12(1):1-16, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09247-0>
- Blasco B., J. J. Rios, L. M. Cervilla, E. Sánchez-Rodríguez, 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(3):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(13):1958-1969, <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.716889>
- Carvalho S. and M. Vasconcelos (2013) Producing more with less: 'omics' at the service of 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-Macías, L. O. Fuentes-Lara, S. González-Morales, A. Juárez-Maldonado and A. Benavides-Mendoza (2019) Iodine Biofortification of Crops. In: P. K. Jaiwal, A. K. Chhillar, D. Chaudhary and R. Jaiwal (Eds.). Nutritional quality improvement in plants. Concepts and Strategies in Plant Sciences. Springer, Cham. 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, T. Takács, M. Rékási 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(5):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, 10.1016/j.foodchem.2018.06.093
- Incrocci L., G. Carmassi, R. Maggini, C. Poli, D. Saidov, C. Tamburini, C. Kiferle, P. Perata 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(1):178-182.
- 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, 10.3389/fpls.2013.00205
- Kiferle C., M. Martinelli, A. M. Salzano, S. Gonzali, S. Beltrami, P. A. Salvadori, K. Hora, H. T. Holwerda, A. Scaloni and P. Perata (2021) Evidences for a nutritional role of iodine in plants. *Frontiers in Plant Science* 7, 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(3):480-486, <https://doi.org/10.1002/jpln.201000395>
- Lara-Izaguirre A. Y., A. N. Rojas-Velázquez, I. Alia-Tejacal, J. A. Alcalá-Jáuregui (2022) Sodium chloride on bioactive compounds of eggplant (*Solanum melongena* L.) grown in hydroponics under two protected structures. *Agrociencia* 56(2):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, J. W. Liu, J. Zhou 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-Álvarez (2019) Effect of preharvest growth bioregulators on physicochemical quality of saladette tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 25(1):29-43, doi: 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. Lakshminarasaiyah, J. Gopas and I. Nishigaki (2014) Antioxidants and human diseases. *Clinica Chimica Acta*, 436:332-347, 10.1016/j.cca.2014.06.004
- Re R., N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang and C. Rice-Evans (1999) Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization

assay. *Free Radical Biology & Medicine* 26:1231-1337, [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)

SAS Institute Inc. (2002) Statistical Analysis System version 9.0. Windows. Cary, NC, USA: SAS Institute, Inc.

Sarrou E., A. S. Siomos, S. Riccadona, D. C. Aktsoğlu, P. Tsouvaltzi, A. Angeli, P. Franceschi, P. Chatzopolou, U. Vrhovsek 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>

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, [10.3389/fpls.2018.00170](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00170)

Smoleń S., I. Kowalska, Ł. Skoczylas, M. Tabaszewska, J. Pitala, J. Mrozek 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>

Smoleń S., I. Ledwożyw-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., 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>

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, [10.1002/jsfa.3902](https://doi.org/10.1002/jsfa.3902).

Waterman P. G. and S. Mole (1994) Analysis of phenolic plant metabolites, Osney Mead, Oxford, England. 235 p.

CAPÍTULO V

**EFFECTO DEL SELENIO EN EL CRECIMIENTO DE PLANTAS Y CALIDAD
NUTRACÉUTICA DE FRUTOS DE BERENJENA (*Solanum melongena* L.)**

**SELENIUM EFFECT ON PLANT GROWTH AND NUTRACEUTICAL
QUALITY OF EGGPLANT FRUITS (*Solanum melongena* L.)**

RESUMEN

El selenio (Se) es elemento esencial para humanos y animales, en plantas se considera un elemento benéfico por su actividad antioxidante. En el presente estudio se evaluó el efecto del Se en el cultivo de berenjena en el crecimiento de la planta y calidad nutracéutica de los frutos. Se cultivaron plantas de berenjena bajo cinco dosis de Se 0,10, 30, 60 y 90 μM con 11 unidades experimentales, en un diseño completamente al azar, se analizó mediante un ANOVA y una comparación de medias con Tukey ($p \leq 0.05$). Las variables evaluadas fueron altura, área foliar, número de hojas, biomasa aérea, rendimiento, peso y diámetros del fruto. En los frutos se evaluaron sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT), índice de sabor (IS), vitamina C, flavonoides totales, fenoles totales, antocianinas y actividad antioxidante. Las dosis de Se aplicadas a las plantas de berenjena no mostraron efectos en el peso seco de las plantas, AT, IS, fenoles y flavonoides totales en los frutos. La aplicación de 90 μM de Se disminuyó altura en 23%, número de hojas en 23%, dosis de 30, 60 y 90 μM disminuyeron área foliar en 27%. La dosis de 60 μM disminuyó el rendimiento en 36%, peso de los frutos en 36% y diámetro polar en 23%. En los frutos dosis de 30 μM mostró 22% menos SST y dosis de 10 μM aumentó en 19% la concentración de vitamina C, 12% la actividad antioxidante, sin embargo, disminuyó en 62% el contenido de antocianinas. La dosis 90 μM no pudo compararse debido a que provocó aborto floral y por lo tanto no se logró la formación de frutos. La aplicación de dosis bajas de Se en plantas de berenjena puede ser benéfico en la calidad nutracéutica de los frutos sin afectar el crecimiento de las plantas.

Palabras clave: Selenato, Selenito, Nutraceúticos, *Solanum melongena* L.

SUMMARY

Selenium (Se) is an essential element for humans and animals, in plants it is considered a beneficial element due to its antioxidant activity. In the present study, the effect of Se in eggplant cultivation on plant growth and the nutraceutical quality of the fruits was evaluated. Eggplant plants were grown under five doses of Se 0, 10, 30, 60 and 90 μM with 11 experimental units, in a completely randomized design, analyzed by ANOVA and a comparison of means with Tukey ($p \leq 0,05$). The variables evaluated were height, leaf area, number of leaves, aerial biomass, yield, weight and diameter of the fruit. Total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), flavor index (FI), vitamin C, total flavonoids, total phenols, anthocyanins and antioxidant activity were evaluated in the fruits. The doses of Se applied to the eggplant plants did not show effects on the dry weight of the plants, TA, FI, phenols and total flavonoids in the fruits. The application of 90 μM of Se height will reach 23%, number of leaves in 23%, doses of 30, 60 and 90 μM reducing leaf area by 27%. The 60 μM dose should yield 36%, fruit weight 36% and polar diameter 23%. In the fruits, the dose of 30 μM showed 22% less TSS and a dose of 10 μM increased the concentration of vitamin C by 19%, the antioxidant activity by 12%, however, it will be needed by 62% the anthocyanin content. The 90 μM dose could not be compared because floral abortion occurred and therefore fruit formation was not modified. The application of low doses of Se in eggplant plants can be beneficial in the nutraceutical quality of the fruits without affecting plant growth.

Keywords: Selenate, Selenite, Nutraceuticals, *Solanum melongena* L.

INTRODUCCIÓN

El selenio (Se) es un nutriente esencial para humanos y animales (Mimmo *et al.*, 2017), es un elemento químicamente similar al azufre, tiene dos formas inorgánicas oxidadas, selenito (SeO_3) y selenato (SeO_4), que son las dos formas principales disponibles para la absorción de plantas en suelos (Longchamp *et al.*, 2013). La concentración de Se en las hojas de las plantas, suele estar por debajo de $100 \text{ mg Se kg}^{-1}$ de peso seco, solo un número de especies que crecen en áreas ricas en Se pueden acumular una gran cantidad de este ion en las hojas (Puccinelli *et al.*, 2017). La forma química de este elemento influye en la toxicidad, los efectos adversos del Se comienzan a aparecer a concentraciones más bajas de selenito que de selenato (Trippe *et al.*, 2021). Las plantas están expuestas constantemente a los efectos de las especies reactivas de oxígeno (ERO) que producen estrés oxidativo, al acumular peróxido de hidrógeno (H_2O_2) lo cual induce una secuencia de reacciones y/o provoca una oxidación inespecífica de proteínas, lípidos de membrana o daños del ADN (Mora *et al.*, 2015). El Se debido a su acción antioxidante, tiene un efecto positivo a bajas concentraciones y aumentar así el crecimiento de las plantas (Puccinelli *et al.*, 2017; Schiavon *et al.*, 2020), mejora la tolerancia de a diversos estreses abióticos (Farman *et al.*, 2021) y es útil para las plantas solo cuando se encuentran bajo estrés oxidativo, de lo contrario no es beneficioso (Hossain *et al.*, 2021).

La aplicación de fertilizantes enriquecidos con micronutrientes tiene un impacto ambiental negativo mínimo, su desventaja es que estos se acumulan con el tiempo y causan toxicidad si se aplican repetidamente en grandes cantidades (De Valença *et al.*, 2017). El Se afecta la calidad de frutas y verduras, la capacidad de algunos cultivos para acumular este ion es crucial para la nutrición y la salud humana (Puccinelli *et al.*, 2017). Estudios demuestran que el Se ejerce diferentes efectos en el crecimiento, calidad organoléptica y compuestos nutraceuticos de los cultivos, según la dosis y forma aplicada como lo demuestran diferentes autores. Saeedi *et al.* (2021) mencionan que la aplicación de selenato en coliflor con dosis de 5 a 20 mg L^{-1} no mostraron efectos en área foliar y 10 mg L^{-1} aumentó peso seco de hojas y rendimiento de los floretes. Hawrylak-Nowak *et al.* (2013) en lechuga con $20 \text{ }\mu\text{M}$ de selenato y selenito disminuyó área foliar y 15 a $20 \text{ }\mu\text{M}$ disminuyó la biomasa seca de los brotes. Mimmo *et al.* (2017) en fresa con 10 y $100 \text{ }\mu\text{M}$

de selenato no afectó el rendimiento y dosis de 100 μM aumentó el área foliar y los sólidos solubles totales en frutos, índice de sabor y antocianinas, sin afectar el contenido fenólico y los flavonoides. Zahedi *et al.* (2019) en frutos de granada 1 y 2 μM disminuyeron acidez titulable y aumentó índice de sabor, compuestos fenólicos, antocianinas y actividad antioxidante.

La berenjena (*Solanum melongena* L.) es un cultivo agrícola de alto rendimiento en la familia de las solanáceas, actualmente el interés por este cultivo está en aumento debido a sus altos valores nutricionales (Karimi *et al.*, 2021), contiene compuestos fenólicos identificados como los principales compuestos bioactivos responsables de sus efectos antioxidantes (Sharma y Kaushik, 2021). Las plantas son una fuente importante de compuestos antioxidantes, los cuales se encuentran en hierbas, frutas y verduras, el Se está asociado a las propiedades antioxidantes (Sotek *et al.*, 2019). Lo cual puede aumentar la calidad de los frutos con beneficios de estos compuestos en la dieta. Por lo anterior, el objetivo de este estudio es evaluar el efecto del Se en el cultivo de berenjena en el crecimiento de la planta y calidad nutracéutica de los frutos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio del Experimento

El experimento se realizó en el ciclo verano-invierno (julio-enero) del 2021-2022 en la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí, en San Luís Potosí, México. En un invernadero tipo túnel con dimensiones de 5 x 9 m, donde se registró una temperatura media de 17.91 °C y una luminosidad media de 232.48 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, medido con un registrador de temperaturas HOBO (Onset UA-002-08 Pendant Temperature/Light Data Logger).

Condiciones de Crecimiento

Se sembraron semillas de berenjena de la variedad “Black Beauty” (Caloro[®]) de un porcentaje de germinación del 85%, en charolas de poliestireno de 220 cavidades, se utilizó un sustrato comercial a base de turba ácida BM2 Berger[®]. Cuando las plántulas alcanzaron las cuatro hojas verdaderas, a los 84 días después de la siembra, se trasplantaron a macetas de plástico negro de 10 L de capacidad, con tezontle rojo con una granulometría de 5 a 6 mm, bajo un sistema de riego por goteo.

Se utilizó la solución universal de Steiner (1984), con los fertilizantes $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 y H_3PO_4 y micronutrientes Carboxy[®] Micro, con 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 con H_3PO_4 a 5.5.

Diseño y Unidad Experimental

Se realizó el experimento bajo un diseño completamente al azar, con cinco tratamientos 0, 10, 30, 60 y 90 μM de Na_2SeO_3 . La unidad experimental fue una planta y se establecieron 11 repeticiones por tratamiento.

Tratamientos

Se aplicaron cinco dosis de selenio (Na_2SeO_3 , Golden Bell^{MR}) a la solución nutritiva Steiner en la etapa de floración (63 días después del trasplante): 0, 10, 30, 60 y 90 μM de Na_2SeO_3 .

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

A la cosecha, se evaluó la altura de las plantas, se utilizó una cinta métrica y se reportó en cm. El número de hojas se contabilizó de forma visual. El área foliar se midió con un medidor laser de área foliar (CI-202 CID Bio-Science, Camas, Washington, USA) y se reportó en cm². Para determinar el peso seco se colocó la parte aérea (tallos y hojas) en una estufa de secado de aire forzado (Omron, Kyoto, Japón) a 70 °C durante 72 h hasta obtener peso constante, medido en una balanza digital (Ohaus[®] PAJ4102N Gold series, EUA) reportado en g.

Rendimiento y características físicas del fruto

Se cosecharon frutos maduros a partir de los 65 días después de la aplicación de los tratamientos, se pesaron en una balanza digital (Ohaus[®] PAJ4102N Gold series, EUA), el peso se reportó en g. Los diámetros polar y ecuatorial de los frutos se midieron con un calibrador vernier (Treceable[®]) se reportó en mm.

Análisis de frutos

Para evaluar el contenido de compuestos bioactivos y organolépticos, se tomaron 8 frutos maduros por tratamiento, se lavaron con agua destilada y se guardaron en un congelador a -80 °C hasta su análisis. Las dosis de 60 y 90 µM de Na₂SeO₃ afectaron el crecimiento de las plantas de berenjena, por lo que no se obtuvieron frutos de esos dos tratamientos.

Sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (AT) e índice de sabor (IS)

Los extractos se realizaron con 1 g de pulpa en 10 ml de agua destilada, en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX[®], IKA) y posteriormente se filtraron. Los SST se determinaron con dos gotas de muestra colocados en un refractómetro digital de bolsillo (PAL-1, Atago[®]) y los resultados se reportaron en °Brix. La AT se determinó de acuerdo con la AOAC (1990), se usó fenolftaleína como indicador y los resultados se expresaron como % de ácido cítrico. El índice de sabor se determinó como el cociente entre SST y AT.

Antocianinas

Las antocianinas se evaluaron por el método de pH diferencial de la AOAC (Lee *et al.*, 2005). Se homogenizaron 2 g de cáscara en 8 ml de buffer pH 1 y pH 4.5 en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX[®], IKA) y se centrifugaron a 6000 rpm por 10 minutos. Se midió la absorbancia a 520 y 700 nm en un espectrofotómetro. Los resultados se reportan como equivalentes de delfinidina-3-rutinósido en mg/L.

Vitamina C

Se preparó extracto para el análisis de vitamina C al homogenizar 2.0 g de pulpa en 8 ml de ácido tricloroacético (TCA) y 2.0 g de cáscara en 8 ml de TCA en un homogeneizador T 25 digital (ULTRA-TURRAX[®], IKA) y se centrifugó a 12000 rpm por 10 minutos a 4 °C. El ácido ascórbico se determinó de acuerdo al método colorimétrico descrito por Jagota y Dani (1982) con algunas modificaciones. Se midió la absorbancia a 760 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (GENESYS 10S, Thermo Scientific[™]). La curva de calibración se hizo con el uso de ácido ascórbico (AA) y los resultados se reportan en $\mu\text{g AA } 100 \text{ g}^{-1}$ de peso fresco.

Flavonoides

El contenido total de flavonoides se determinó de acuerdo con el método de tricloruro de aluminio de acuerdo a Arvouet-Grand *et al.* (1994). 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[™]) y se realizó una curva estándar de quercetina. Los resultados se expresaron en mg de quercetina (EQ) 100 g^{-1} de peso fresco.

Preparación de extractos para fenoles y actividad antioxidante

Se preparó el extracto con 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 posteriormente se filtró.

Fenoles

Los fenoles totales se determinaron con el método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu, como lo describen Waterman & Mole (1994), con algunas modificaciones. Se midió la absorbancia a 760 nm. La curva estándar se realizó con el uso de ácido gálico y los resultados se expresaron en mg de ácido gálico (EAG) 100 g⁻¹ de peso fresco.

Actividad antioxidante

La actividad antioxidante se determinó mediante el método de ABTS de acuerdo a 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.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$), mediante el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) versión 9,0 (SAS Institute Inc., 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento de las Plantas de Berenjena

La dosis de 90 μM de Se aplicada a las plantas de berenjena disminuyó en 23% la altura de las plantas al compararlo con las dosis 0 y 10 μM . Dosis de 30 y 60 μM no tuvieron diferencias con estas dosis (Cuadro 1). Así mismo, la dosis de 90 μM disminuyó en 23% el número de hojas respecto a 0 μM . Dosis de 10, 30 y 60 μM no tuvieron diferencias con estas dosis (Cuadro 1). Caso contrario, en el cultivo de berenjena dosis de 5 mg L^{-1} de selenito foliar aumentó en 17% la altura de las plantas respecto al testigo sin aplicación foliar, además aumentó el número de hojas en 21% (Ghazi, 2018). Mencionan Hasanuzzaman *et al.* (2020) que la reducción del crecimiento inducida por Se podría ser una consecuencia de alteraciones en el equilibrio de la nutrición mineral, ya que afecta diferentes reacciones bioquímicas y procesos fisiológicos como crecimiento, fotosíntesis, respiración, intercambio de gases y captación de agua.

Las dosis 30, 60 y 90 μM de Se aplicadas a las plantas de berenjena mostraron 27% menor área foliar respecto a las dosis 0 y 10 μM (Cuadro 1). En el mismo sentido, en plantas de lechuga al aplicar 20 μM de selenito disminuyó en 47% el área foliar, sin embargo, dosis menores entre 2 a 10 μM Se en forma de selenato disminuyeron entre 12 y 27% respecto al testigo (Hawrylak-Nowak *et al.*, 2013). Caso contrario, en cultivares de coliflor dosis de 5, 10, 15 y 20 mg L^{-1} de selenato mostraron un aumento en el área foliar entre 11 y 15% respecto al testigo (Saeedi *et al.*, 2021). En plantas de granada la aplicación foliar de 1 μM de selenato aumentó en 14 a 15% el área foliar y con 2 μM en 5 a 6% respecto al testigo (Zahedi *et al.*, 2019). La toxicidad por Se, se da por dos mecanismos, malformación de selenoproteínas y la inducción del estrés oxidativo, provocado por dosis altas de Se que actúa como prooxidante y genera ERO (Gupta *et al.*, 2017). La aplicación de Se muestra efectos diferentes en los cultivos de acuerdo a la especie y a la dosis aplicada, en este estudio, el cultivo de berenjena mostró que las dosis mayores a 30 μM generan una toxicidad en las plantas al reducir el área foliar.

La aplicación de Se no modificó el peso seco de las plantas de berenjena, puesto que no se observaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Cuadro 1). En

un estudio en plantas de berenjena dosis de 5 mg L⁻¹ de selenito foliar aumentó en 23% el peso seco de las hojas respecto al testigo sin aplicación de Se (Ghazi, 2018). En cultivares de coliflor con dosis de 10 mg L⁻¹ de selenato indujeron un aumento del 25 y 33% el peso seco de las hojas (Saeedi *et al.*, 2021). Caso contrario, mencionan Hawrylak-Nowak *et al.* (2013) que en el cultivo de lechuga dosis de 20 y 15 µM selenato y selenito disminuyeron en 12 y 25% la biomasa de los brotes.

Cuadro 1. Crecimiento de las plantas de berenjena bajo dosis de Na₂SeO₃.

	Altura cm	Núm. de hojas	Área foliar cm ²	Peso seco aéreo g
0 µM Se	128.87 a	35.25 a	3261.0 a	77.50 a
10 µM Se	130.25 a	34.00 ab	3002.0 a	83.57 a
30 µM Se	116.55 ab	32.25 ab	2189.0 b	70.50 a
60 µM Se	110.70 ab	30.25 ab	1978.3 b	73.17 a
90 µM Se	100.15 b	27.00 b	1867.7 b	56.47 a
DMS	21.12	7.04	768.37	27.56
CV	8.24	10.16	14.30	17.47

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). *: significancia estadística al 5%; **: significancia estadística al 1%; ns: no significativo; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa.

Características de Frutos de Berenjena

La dosis de 60 µM de Se aplicada a las plantas de berenjena disminuyó el rendimiento en 36% respecto a la dosis 0 µM, y no mostró diferencias con las dosis 10 y 30 µM. Además, dosis de 0, 10 y 30 µM no mostraron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 2). Mencionan Mimmo *et al.* (2017) que la adición de Se en la solución nutritiva no influye negativamente en la fertilidad de las fresas, no reduce el rendimiento, peso y número de frutos. En plantas de granada la aplicación foliar de 1 µM de selenato aumentó en 7 a 11% el rendimiento y 2 µM aumentó en 5% respecto al testigo (Zahedi *et al.*, 2019). En cultivares de coliflor, la aplicación de 10 mg L⁻¹ de selenato aumentó el rendimiento entre 15 y 23% respecto a dosis 0, 5, 15 y 20 mg L⁻¹ (Saeedi *et al.*, 2021).

Dosis de 60 μM de Se aplicada a las plantas, disminuyó el peso de los frutos de berenjena en 36%, esta dosis no mostró diferencias con 10 y 30 μM . Dosis de 0, 10 y 30 μM no mostraron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 2). En plantas de granada la aplicación foliar de 1 y 2 μM de selenato aumentó en 3 a 4% el peso de los frutos respecto al testigo (Zahedi *et al.*, 2019).

La dosis de 60 μM de Se aplicada a las plantas mostró 23% menor diámetro polar de los frutos en comparación con 0 μM , y no mostró diferencias con las dosis 10 y 30 μM . Dosis de 0, 10 y 30 μM de Se no mostraron diferencias estadísticas significativas. Las dosis aplicadas no influyeron en el diámetro ecuatorial de los frutos de berenjena (Cuadro 2). En el cultivo de berenjena dosis de 5 mg L^{-1} de selenito foliar aumentó la altura del fruto en 24% y el diámetro del fruto en 22% respecto al testigo, además aumentó el rendimiento en 17% (Ghazi, 2018). En el cultivo de tomate la aplicación de 0, 75, 125 y 175 mg L^{-1} de selenito no mostraron diferencias en los diámetros polar y ecuatorial de los frutos (Martínez-Damián *et al.*, 2019).

La dosis de 60 y 90 μM de Se aplicadas a las plantas de berenjena afectaron el rendimiento, a partir del primer mes de aplicadas se mostró un efecto de aborto floral, donde posteriormente las flores se desprendían de la planta, con 90 μM no se logró obtener ningún fruto y con dosis de 60 μM se logró un 15% de frutos comparado con el testigo sin aplicación de Se (datos no mostrados), los cuales tenían una calidad inferior a los demás tratamientos, con un menor peso y diámetro polar lo cual afectó el rendimiento (Cuadro 2; Figura 1 D).

Cuadro 2. Características de frutos de berenjena bajo dosis de Na_2SeO_3 .

	Rendimiento	Peso del fruto	Diámetro polar	Diámetro ecuatorial
	g/planta	g	mm	mm
0 μM Se	17.44 a	191.80 a	82.11 a	79.72 a
10 μM Se	16.99 ab	186.87 ab	79.79 ab	77.36 a
30 μM Se	14.20 ab	156.23 ab	73.70 ab	82.30 a
60 μM Se	11.20 b	123.23 b	63.02 b	70.20 a

DMS	6.15	67.73	18.31	15.78
CV	32.22	32.22	19.87	17.06

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). *: significancia estadística al 5%; **: significancia estadística al 1%; ns: no significativo; CV: coeficiente de variación; DMS: diferencia mínima significativa. Con dosis de 90 μM no se obtuvieron frutos.



Figura 1. Frutos de berenjena bajo dosis de selenio A) 0 μM , B) 10 μM , C) 30 μM y D) 60 μM (con dosis de 90 μM no se obtuvieron frutos).

Características Organolépticas en Frutos de Berenjena

Las plantas donde se aplicaron dosis altas de Se no pudieron compararse debido a que provocaron aborto floral, lo que afectó el rendimiento y calidad de los frutos de berenjena, en el caso de la dosis 60 μM la muestra de frutos no fue suficiente para realizar los análisis de variables organolépticas y con 90 μM no hubo formación de frutos.

Las dosis de Se aplicadas a las plantas de berenjena, no mostraron diferencias estadísticas significativas en la acidez titulable y el índice sabor de los frutos (Figura 2 B, C). En plantas de granada la aplicación foliar de 1 y 2 μM de selenato disminuyó en 12% la AT y aumentó en 10 a 13% el IS en los frutos respecto al testigo, esto sugiere que el Se podría ejercer una influencia positiva en el sabor de los frutos (Zahedi *et al.*, 2019). En un estudio con fresa a 100 μM de selenato, se observó un incremento de 23% en el IS de los frutos respecto al testigo y a la dosis 10 μM , y no se mostró efecto en la AT (Mimmo *et al.*, 2017).

Dosis de 30 μM de Se aplicada a las plantas disminuyó en 22% los sólidos solubles totales en los frutos de berenjena respecto a las dosis 0 y 10 μM (Figura 2 A). Caso

contrario Mimmo *et al.* (2017) observaron un incremento del 24% en los SST en frutos de fresa con la aplicación de 100 μM de selenato respecto a dosis 10 μM y al testigo. En plantas de granada la aplicación foliar de 1 μM de selenato aumentó en 5 a 7% los SST en los frutos y con dosis de 2 μM no se mostraron diferencias respecto al testigo (Zahedi *et al.*, 2019).

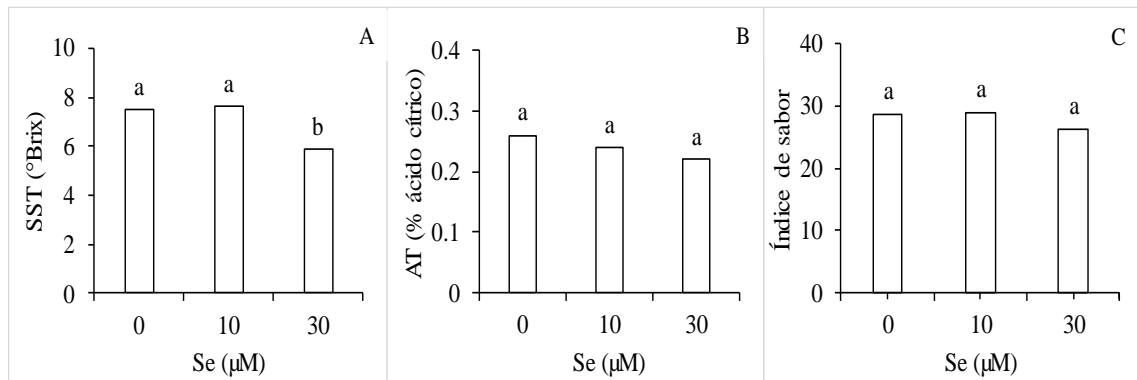


Figura 2. Efecto de dosis de selenio en A) Sólidos solubles totales, B) Acidez titulable y C) Índice de sabor en frutos de berenjena. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). (Con dosis de 60 y 90 μM no se obtuvieron muestras suficientes de frutos).

Calidad Nutracéutica de Frutos de Berenjena

Las plantas donde se aplicaron dosis altas de Se no pudieron compararse debido a que provocaron aborto floral, lo que afectó el rendimiento y calidad de los frutos de berenjena, en el caso de la dosis 60 μM la muestra de frutos no fue suficiente para realizar los análisis de calidad nutracéutica y con 90 μM no hubo formación de frutos.

Las dosis de Se aplicadas a las plantas de berenjena, no mostraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de fenoles y flavonoides totales en frutos (Figura 3 A, B). En plantas de fresa la aplicación de 10 y 100 μM de selenato no mostraron efecto respecto al testigo en el contenido fenólico total y flavonoides en los frutos (Mimmo *et al.*, 2017). En plantas de granada el uso de 1 y 2 μM de selenato foliar aumentó en 4 a 5% los compuestos fenólicos totales en los frutos respecto al testigo, lo cual mejoró la tolerancia al estrés abiótico al aumentar la capacidad antioxidante (Zahedi *et al.*, 2019). En cultivares de coliflor dosis de 10 a 20 mg L^{-1} de selenato aumentaron la concentración de fenoles totales entre 11 y 23% (Saeedi *et al.*, 2021). El contenido de flavonoides es

diferente entre cultivares, forma química del Se y dosis aplicada, esto debido a la distinta capacidad de cada genotipo para generar compuestos fenólicos, además, el estrés ambiental y los factores abióticos (Tian *et al.*, 2016).

La dosis de 10 μM de Se aplicada a las plantas de berenjena mostró 19% mayor concentración de vitamina C en los frutos (Figura 3 C). En cultivares de germinados de brócoli con 100 μM de selenato y selenito no se mostraron efectos en el contenido de ácido ascórbico en comparación con el testigo, la concentración de ácido ascórbico y las enzimas del estrés oxidativo están estrechamente relacionadas con factores ambientales, como la temperatura, la luz, la salinidad y la sequía (Tian *et al.*, 2016).

Dosis de 10 μM de Se aplicada a las plantas mostró 62% menor contenido de antocianinas en la cáscara de los frutos (Figura 3 D). En plantas de fresa al aplicar dosis de 10 y 100 μM de selenato se acumularon diferentes tipos de antocianinas en los frutos (Mimmo *et al.*, 2017). En plantas de granada la aplicación foliar de 1 μM de selenato aumentó en 13 a 17% las antocianinas en los frutos respecto al testigo y con dosis de 2 μM aumentó 9 a 12% (Zahedi *et al.*, 2019). En cultivares de germinados de brócoli, la aplicación de 100 μM de selenito aumentó entre 33 y 43% el contenido de antocianinas y con selenato aumentó entre 28 y 55% (Tian *et al.*, 2016). La aplicación de 0.126 mM de selenato y selenito en el cultivo de col no mostró efecto en antocianinas respecto al testigo sin aplicación de Se (Golob *et al.*, 2020).

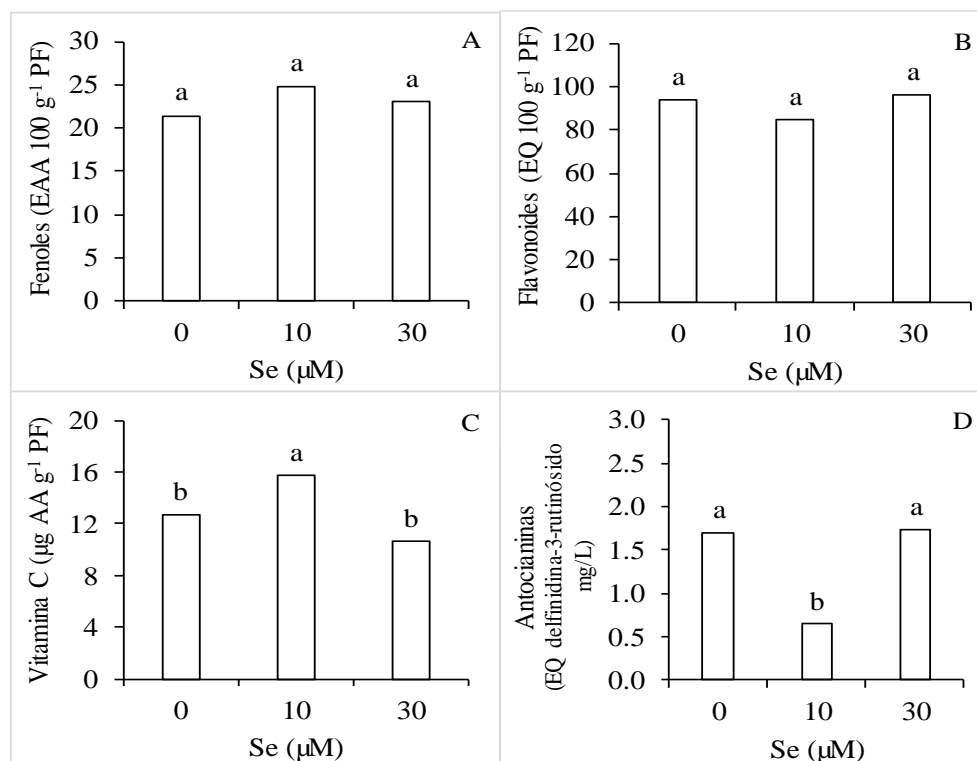


Figura 3. Efecto de dosis de selenio en A) Fenoles, B) Flavonoides, C) Vitamina C y D) Antocianinas en frutos de berenjena. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). (Con dosis de 60 y 90 μM no se obtuvieron muestras suficientes de frutos).

Actividad Antioxidante en Frutos de Berenjena

Las plantas donde se aplicaron dosis altas de Se no pudieron compararse debido a que provocaron aborto floral, lo que afectó el rendimiento y calidad de los frutos de berenjena, en el caso de la dosis 60 μM no se obtuvo la muestra necesaria de frutos para realizar los análisis de actividad antioxidante y con 90 μM no hubo formación de frutos.

Las dosis de Se aplicadas a las plantas mostraron diferencias estadísticas significativas en la actividad antioxidante de los frutos, dosis de 10 μM aumentó en 12% (Figura 5). El contenido de Se en el suelo está correlacionado con la actividad antioxidante en plantas medicinales, al aumentar entre 40 y 90 % (Sotek *et al.*, 2019). Con dosis de 1 y 2 μM de selenato por aspersión foliar en plantas de granada, aumentó entre 11 y 17 % la actividad antioxidante en frutos respecto al testigo (Zahedi *et al.*, 2019). En cultivares de coliflor con dosis de entre 5 a 10 mg L^{-1} de selenato se mostró un aumento de la capacidad antioxidante entre 14 y 51% respecto al testigo (Saeedi *et al.*, 2021). En lechuga, el

aumento de la acumulación de H_2O_2 y malondialdehído con dosis de $15 \mu\text{M}$ de selenito sugiere la aparición de estrés oxidativo y podría explicar parcialmente los efectos tóxicos del Se (Hawrylak-Nowak *et al.*, 2013). A niveles bajos las especies reactivas de oxígeno activan las respuestas de defensa de células bajo estrés y a niveles altos dañan los componentes celulares, por lo que, la regulación del sistema antioxidante inducido por el Se reduce las ERO y así cambia su papel de perjudicial a beneficioso para las plantas (Schiavon *et al.*, 2020). Las antocianinas de la berenjena están asociadas con varias propiedades biológicas, la más importante es la capacidad antioxidante (Karimi *et al.*, 2021). Sin embargo, en este estudio se redujo el contenido de antocianinas con la dosis $10 \mu\text{M}$, misma que aumentó la actividad antioxidante, por lo que, la aplicación de Se en los cultivos muestra respuestas distintas en la actividad antioxidante, en el caso de plantas de berenjena con dosis de $10 \mu\text{M}$ disminuye el estrés abiótico al aumentar la actividad antioxidante a expensas de la coloración en los frutos, disminuyendo el color púrpura oscuro demostrado por las antocianinas.

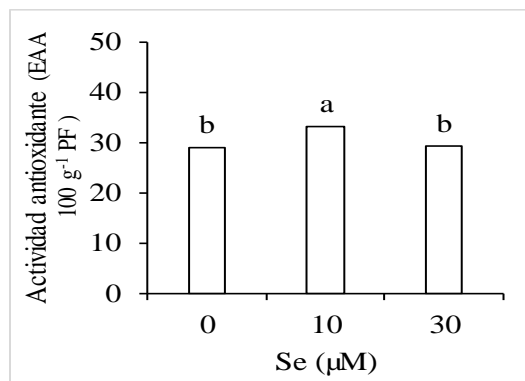


Figura 4. Efecto de dosis de selenio en la actividad antioxidante en frutos de berenjena. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). (Con dosis de 60 y $90 \mu\text{M}$ no se obtuvieron muestras suficientes de frutos).

CONCLUSIONES

El crecimiento de las plantas de berenjena se vio afectado negativamente con el uso de selenio, arriba de 30 μM disminuye el área foliar y a partir de 60 μM disminuye el rendimiento, peso y diámetro de los frutos, con dosis de 90 μM disminuye altura, número de hojas y no se logra formación de frutos.

Las aplicaciones de dosis bajas de selenio en plantas de berenjena pueden resultar benéficas en la calidad nutracéutica de los frutos sin afectar el crecimiento, una dosis de 10 μM disminuye el estrés abiótico al aumentar la actividad antioxidante y vitamina C en los frutos, a expensas de la coloración al disminuir las antocianinas en la cáscara.

LITERATURA CITADA

- AOAC. (1990). Official Methods and Analysis. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Helrich, K. (ed.). 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 principaux constituants. *Journal Pharmacie Belgique* 49:462-468.
- De Valença A. W., A. Bake, I. D. Brouwer and K. E. Giller (2017) Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. *Global Food Security* 12:8-14, <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.12.001>
- Farman M., F. Nawaz, S. Majeed, K. S. Ahmad, R. Rafeeq, M. A. Shehzad, R. N. Shabbir and M. M. Usmani (2021) Interplay between selenium and mineral elements to improve plant growth and development. In Handbook of Bioremediation. Academic Press. pp:221-236, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819382-2.00013-2>
- Ghazi D. (2018) Effect of iron and selenium on growth, yield and quality of eggplant under different mineral fertilization levels. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering* 9(10):525-532, 10.21608/jssae.2018.36456
- Golob A., T. Novak, N. K. Maršić, H. Šircelj, V. Stibilj, A. Jerše, A. Kroflič and M. Germ (2020) Biofortification with selenium and iodine changes morphological properties of *Brassica oleracea* L. var. gongylodes) and increases their contents in tubers. *Plant Physiology and Biochemistry* 150:234-243, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.044>
- Gupta M. and S. Gupta (2017) An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science* 7:2074, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>
- Hasanuzzaman M., M. B. Bhuyan, A. Raza, B. Hawrylak-Nowak, R. Matraszek-Gawron, K. Nahar and M. Fujita (2020) Selenium toxicity in plants and environment: biogeochemistry and remediation possibilities. *Plants* 9(12):1711, 10.3390/plants9121711
- Hawrylak-Nowak B. (2013) Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions. *Plant Growth Regulation* 70(2):149-157, <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9788-5>
- Hossain A., M. Skalicky, M. Brestic, S. Maitra, S. Sarkar, Z. Ahmad, H. Vemuri, S. Garai, M. Mondal, R. Bhatt, P. Kumar, P. Banarjee, S. Saha, T. Islam and A. M. Laing (2021) Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects. *Molecules* 26(4):881, <https://doi.org/10.3390/molecules26040881>

- 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(1):178-182.
- Karimi A., M. Kazemi, S. A Samani and J. Simal-Gandara (2021) Bioactive compounds from by-products of eggplant: Functional properties, potential applications and advances in valorization methods. *Trends in Food Science & Technology* 112:518-531, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.027>
- Lee, J., R. W. Durst and R. E. Wrolstad (2005) Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC INTERNATIONAL* 88(5):1269-1278, <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269>
- Longchamp M., N. Angeli and M. Castrec-Rouelle (2013) Selenium uptake in *Zea mays* supplied with selenate or selenite under hydroponic conditions. *Plant and Soil* 362(1):107-117, [10.1007/s11104-012-1259-7](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1259-7)
- Martínez-Damián M. T., R. Cano-Hernández, E. D. Moreno-Pérez, F. Sánchez-del Castillo, and O. Cruz-Álvarez (2019) Effect of preharvest growth bioregulators on physicochemical quality of saladette tomato. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 25(1):29-43, <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.06.013>
- Mimmo T., R. Tiziani, F. Valentinuzzi, L. Lucini, C. Nicoletto, P. Sambo, M. Scampicchio, Y. Pii and S. Cesco (2017) Selenium biofortification in *Fragaria × ananassa*: implications on strawberry fruits quality, content of bioactive health beneficial compounds and metabolomic profile. *Frontiers in Plant Science* 8:1887, doi: 10.3389/fpls.2017.01887
- Mora M. L., P. Durán, J. Acuña, P. Cartes, R. Demanet and L. Gianfreda (2015) Improving selenium status in plant nutrition and quality. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2):486-503, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000041>
- Puccinelli M., F. Malorgio and B. Pezzarossa (2017) Selenium enrichment of horticultural crops. *Molecules*, 22(6):933, doi:10.3390/molecules22060933
- Re R., N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang and C. Rice-Evans (1999) Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology & Medicine* 26:1231-1337, [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Saeedi M., F. Soltani, M. Babalar, F. Izadpanah, M. Wiesner-Reinhold and S. Baldermann (2021) Selenium fortification alters the growth, antioxidant characteristics and secondary metabolite profiles of cauliflower (*Brassica oleracea* var. botrytis) cultivars in hydroponic culture. *Plants* 10(8):1537, <https://doi.org/10.3390/plants10081537>
- Schiavon M, S. Dall'Acqua, A. Mietto, E. A. Pilon-Smits, P. Sambo, A. Masi, M. Malagoli (2013) Selenium fertilization alters the chemical composition and

- antioxidant constituents of tomato (*Solanum lycopersicon* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61(44):10542–10554, 10.1021/jf4031822
- Schiavon M., S. Nardi, F. Dalla Vecchia and A. Ertani (2020) Selenium biofortification in the 21st century: Status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil* 453(1): 245-270, <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>
- Sharma M. and P. Kaushik (2021) Biochemical composition of eggplant fruits: A review. *Applied Sciences* 11(15):7078, <https://doi.org/10.3390/app11157078>
- Sotek Z., B. Białocka, B. Pilarczyk, R. Drozd, R. Pilarczyk, A. Tomza-Marciniak, B. Kruzhel, H. Lysak, M. Bakowska and S. Vovk (2019) Antioxidant activity and selenium and polyphenols content from selected medicinal plants natives from various areas abundant in selenium (Poland, Lithuania, and Western Ukraine). *Processes* 7(12):878, 10.3390/pr7120878
- Tian M., X. Xu, Y. Liu, L. Xie and S. Pan (2016) Effect of Se treatment on glucosinolate metabolism and health-promoting compounds in the broccoli sprouts of three cultivars. *Food Chemistry* 190:374-380, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.098>
- Trippe III R. C. and E. A. Pilon-Smits (2021) Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. *Journal of Hazardous Materials*, 404:124178. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124178>
- Waterman P. G. and S. Mole (1994) Analysis of phenolic plant metabolites, Osney. Mead, Oxford, England. 235 p.
- Zahedi S. M., M. S. Hosseini, N. D. H. Meybodi and J. A. T. da Silva (2019) Foliar application of selenium and nano-selenium affects pomegranate (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) fruit yield and quality. *South African Journal of Botany* 124:350-358, <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.019>

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES GENERALES

La hipótesis planteada en este trabajo se acepta debido a que se demostró que la calidad nutraceutica de los frutos de berenjena se modifica con la aplicación de iones benéficos como sodio, yodo y selenio en la solución nutritiva.

Los elementos benéficos utilizados en la solución nutritiva en el cultivo de berenjena mostraron una respuesta favorable en la calidad nutraceutica y nutricional de los frutos cosechados.

El uso de sodio en el cultivo de berenjena promueve la calidad nutraceutica de los frutos, con la aplicación de cloruro de sodio en las plantas en dosis de 30 mM aumenta la concentración de vitamina C y la actividad antioxidante.

La biofortificación con yodo en el cultivo de berenjena mejora la calidad nutricional y nutraceutica de los frutos, debido a que, con las dosis de yoduro de potasio aplicadas a las plantas aumenta la concentración de yodo en los frutos, además, con 60 y 90 μM aumentan minerales como magnesio, zinc y manganeso y la actividad antioxidante.

La aplicación de dosis bajas de selenio en el cultivo de berenjena muestra que mejora la calidad nutraceutica de los frutos, demostrado por una mayor concentración de vitamina C y actividad antioxidante con dosis de 10 μM de selenito de sodio.

Cabe mencionar, que el uso de elementos benéficos en el cultivo de berenjena mostró efectos negativos en las plantas en dosis altas. El uso de sodio indujo estrés salino en el cultivo, lo cual disminuyó el crecimiento de las plantas al utilizar dosis altas de cloruro de sodio como 30 y 45 mM. Además, la aplicación de selenio en las plantas disminuyó el crecimiento y rendimiento del cultivo con dosis altas como 60 y 90 μM de selenito de sodio, provocando además aborto floral.