



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS

TESIS DE MAESTRÍA

Aplicación de nanopartículas de Se y su efecto sobre la
calidad fisicoquímica y el comportamiento del sistema
antioxidante en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.).

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencia de los Alimentos

PRESENTA
César Andrés Cabrera Cortés

Director (a)

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes

Codirector (a)

Dr. César Uriel López Palestina

Comité tutorial

Dr. José Manuel Pinedo Espinoza

Dr. Yair Olovaldo Santiago Saenz

Tulancingo de Bravo, Hgo., México., septiembre de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Agropecuarias
School of Forestry and Environmental Studies
Maestría en Ciencia de los Alimentos

COORDINACION DE INVESTIGACION Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencia de los Alimentos
Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "Aplicación de nanopartículas de Se y su efecto sobre la calidad fisicoquímica y el comportamiento del sistema antioxidante en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.)", que desarrolla el estudiante César Andrés Cabrera Cortés

Asistentes:

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes
Dr. César Uriel López Palestina
Dr. José Manuel Pinedo Espinoza
Dr. Yair Olovaldo Santiago Saenz

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por el estudiante, comunicando a el estudiante, César Andrés Cabrera Cortés, oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. El estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que el estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo, 6 de septiembre de 2023

Dra. Alma Delia Hernández Fuentes
Dr. César Uriel López Palestina
Dr. José Manuel Pinedo Espinoza
Dr. Yair Olovaldo Santiago Saenz



Handwritten signatures of the committee members in blue ink over horizontal lines.



Avenida Universidad Km. 1 s/n, Exhacienda Aquetzapa,
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México; C.P. 43600
Teléfono +52 (771) 71 72000 ext. 2425
maestria_alimentos@uaeh.edu.mx



AGRADECIMIENTOS

Al ver los resultados obtenidos de este proyecto que inicio con gran entusiasmo y que poco a poco fue creciendo hasta llegar a su culminación, que me ha dejado muchas enseñanzas y un gran crecimiento profesional, quiero expresar mi agradecimiento, por el apoyo y la confianza que me brindaron al realizar esta tesis.

Primero, quiero agradecer a mi directora la Dra. Alma Delia Hernández Fuentes por abrirme las puertas y recibirme en su equipo de trabajo, también, por su compromiso, dedicación y orientación a lo largo de este proceso. Ayudado a mejorar con sus aportaciones oportunas y consejos.

Agradezco también de manera especial a mi codirector el Dr. César Uriel López Palestina, quien siempre me brindó su apoyo, dedicación, compromiso y tiempo. Siendo tan compartido con su conocimiento y experiencia que me han permitido crecer de manera profesional. Por sus consejos, tolerancia y comprensión a lo largo de este proyecto, gracias.

Por otro lado, agradecer a mis asesores al Dr. Yair Olovaldo Santiago Saenz por sus consejos, paciencia, tolerancia, así como, por el tiempo dedicado a esta tesis que aportó grandes mejoras gracias por su apoyo. Al Dr. José Manuel Pinedo Espinoza también por sus consejos, aportaciones y comentarios de gran utilidad en este trabajo.

A mis compañeros de laboratorio quienes me brindaron su apoyo, consejos, paciencia y compartieron sus conocimientos. Agradezco a verlos conocidos Anay, Susan, Adri, Mire, Chris, Iza, Erasto, Ara gracias por los buenos momentos y la convivencia diaria.

Asimismo, mencionar a mi familia que siempre ha estado ahí apoyándome y dándome aliento, los ánimos constantes, la comprensión y el cariño para realizar este proceso. Gracias por todo.

También quiero agradecer al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo brindado a través de la beca otorgada, por otra parte, a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y el Instituto de Ciencias Agropecuarias por proporcionar las instalación e infraestructura para llevar a cabo esta investigación.

Por último, esta tesis no se habría concluidos sin la colaboración de todas estas personas.

De todo corazón, muchas gracias a todos.

DEDICATORIAS

A mi madre Natalia que siempre me ha apoyado y alentado a seguirme superando en todo. Por su cariño infinito siempre siendo un motor que me impulsa a alcanzar mis logros académicos. Esta tesis es una muestra de su amor y comprensión.

A mi hermana Carolina que siempre ha estado ahí desafiándome, comprendiéndome, ayudando de muchas maneras y aun a distancia animando a seguir los objetivos de vida que quiero realizar. Con su cariño dándome fortaleza para el futuro. Esta tesis está dedicada al gran vínculo que hemos construido y que siempre compartiremos.

A mi hermano Manolo, al cual aun con la distancia apoya y me anima a seguir cumpliendo con mis objetivos.

A mi padre Juan Manuel por su comprensión y apoyo a seguirme superando profesionalmente.

Aquellas personas importantes en mi vida que hoy ya no se encuentran con nosotros. Esta tesis es un tributo a la influencia eterna que ejercieron en mi vida.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. RESUMEN | 4 |
| 2. ABSTRACT | 6 |
| 3. INTRODUCCIÓN | 8 |
| 4. OBJETIVO GENERAL..... | 10 |
| 5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 10 |
| 6. HIPÓTESIS..... | 11 |
| 7. JUSTIFICACIÓN..... | 11 |
| 8. DIAGRAMA METODOLÓGICO..... | 12 |
| 9. MARCO TEÓRICO | 13 |
| 9.1. Taxonomía y morfología de la verdolaga..... | 13 |
| 9.2. Importancia nutricional..... | 14 |
| 9.2.1. Compuestos bioactivos..... | 14 |
| 9.2.1.1. Ácidos fenólicos | 14 |
| 9.2.1.2. Flavonoides..... | 15 |
| 9.2.1.3. Antocianinas..... | 15 |
| 9.2.1.4. Lignanos..... | 15 |
| 9.2.1.5. Terpenoides | 16 |
| 9.2.1.6. Homoisoflavonoides..... | 16 |
| 9.2.2. Propiedades biológicas..... | 17 |
| 9.2.2.1. Actividad antioxidante | 17 |
| 9.2.2.2. Actividad antimicrobiana | 17 |
| 9.2.2.3. Actividad antiinflamatoria | 18 |
| 9.2.2.4. Actividad antihipertensiva..... | 18 |
| 9.2.2.5. Actividad antidiabética | 19 |
| 9.2.3. Aplicaciones pecuarias..... | 19 |
| 9.2.4. Otras propiedades | 20 |
| 9.3. Nanotecnología | 21 |
| 9.3.1. Nanopartículas..... | 21 |
| 9.3.1.1. Nanopartículas de selenio (Se)..... | 22 |
| 10. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 26 |
| 10.1. Localización del experimento..... | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 10.2. Material vegetal y nanopartículas..... | 26 |
| 10.3. Establecimiento del experimento | 26 |
| 15.3.1. Riego..... | 27 |
| 15.3.2. Manejo del cultivo..... | 27 |
| 10.4. Diseño de tratamientos | 27 |
| 10.5. Cosecha y preparación de las muestras..... | 27 |
| 10.6. Variables de estudio | 28 |
| 10.6.1 Determinaciones fisicoquímicas | 28 |
| 10.6.1.1 Longitud y diámetro | 28 |
| 10.6.1.2 Peso | 28 |
| 10.6.1.3 Sólidos solubles totales o grados Brix (°Brix) | 28 |
| 10.6.1.4 pH..... | 28 |
| 10.6.1.5 Acidez titulable | 29 |
| 10.6.1.6 Índice de sabor..... | 29 |
| 10.6.1.7 Color..... | 30 |
| 10.6.2 Compuestos bioactivos | 30 |
| 10.6.2.1 Fenoles totales | 30 |
| 10.6.2.2 Flavonoides | 31 |
| 10.6.2.3 Ácido ascórbico | 31 |
| 10.6.2.4 Carotenoides | 31 |
| 10.6.2.5 Clorofila | 32 |
| 10.6.2.6 Antocianinas..... | 32 |
| 10.6.3 Actividad antioxidante no enzimática | 33 |
| 10.6.3.1 Método DPPH* (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo)..... | 33 |
| 10.6.3.2 Método de ABTS** [2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico)] | 33 |
| 10.6.4 Actividad antioxidante enzimática | 34 |
| 10.6.4.1 Actividad del superóxido dismutasa (SOD; EC 1.15.1.1) | 34 |
| 10.6.4.2 Actividad de la catalasa (CAT; EC 1.11.1.6) | 35 |
| 10.6.4.3 Actividad del ascorbato Peroxidasa (APx; EC 1.11.1.11)..... | 35 |
| 10.6.4.4 Actividad del guayacol Peroxidasa (POD; EC 1.11.1.7) | 35 |
| 10.6.4.5 Actividad de la polifenoloxidasas (PPO; E.C. 1.14.18.1 y E.C. 1.10.3.1) | 36 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 10.6.4.6 | Peróxido de Hidrógeno (H ₂ O ₂) | 36 |
| 10.6.4.7 | Peroxidación lipídica..... | 36 |
| 10.6.5 | Análisis de resultados..... | 37 |
| 11. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 38 |
| 11.1. | Comportamiento en propiedades fisicoquímicas verdolaga por efecto de la concentración de nanopartículas de selenio..... | 40 |
| 11.1.1. | Variación en dimensiones (peso, longitud y diámetro) | 40 |
| 11.1.2. | Variación en el color | 43 |
| 11.1.3. | Variación de pH, acidez titulable, grados °Brix..... | 44 |
| 11.2. | Comportamiento de compuestos bioactivos verdolaga por efecto de la aplicación de NPs Se a diferentes concentraciones | 45 |
| 11.2.1. | Concentración de ácido ascórbico | 45 |
| 11.2.2. | Concentración de carotenoides | 47 |
| 11.2.3. | Concentración de clorofila | 48 |
| 11.2.4. | Concentración de fenoles y flavonoides | 49 |
| 11.2.5. | Concentración de antocianinas. | 51 |
| 11.3. | Actividad antioxidante no enzimática en verdolaga por efecto de la concentración de nanopartículas de selenio | 52 |
| 11.3.1. | Variación de la actividad antioxidante mediante la capacidad de inhibición del radical DPPH• | 52 |
| 11.3.2. | Variación de la actividad antioxidante mediante la capacidad de inhibición del radical ABTS*+ | 54 |
| 11.4. | Actividad enzimática y marcadores de daño en verdolaga por efecto de la concentración de nanopartículas de selenio..... | 54 |
| 11.4.1. | Actividad enzimática en verdolaga | 54 |
| 11.4.2. | Marcadores de daño en verdolaga..... | 58 |
| 12. | CONCLUSIONES..... | 60 |
| 13. | REFERENCIAS..... | 61 |
| 14. | ANEXOS | 72 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Crecimiento de verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) a los días 0 (A), 3 (B), 7 (C), 15 (D), 22 (E) y 35 (F)..... | 38 |
| Figura 2. Crecimiento de verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) posterior a la primera aplicación foliar de (A) 5 mg L ⁻¹ NPs Se (B) 25 mg L ⁻¹ NPs Se (C) 50 mg L ⁻¹ NPs Se (D) 250 mg L ⁻¹ NPs Se (E) 500 mg L ⁻¹ NPs Se (F) 0 mg L ⁻¹ NPs Se..... | 39 |
| Figura 3. Crecimiento de verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) posterior a la segunda aplicación foliar de (A) 5 mg L ⁻¹ NPs Se (B) 25 mg L ⁻¹ NPs Se (C) 50 mg L ⁻¹ NPs Se (D) 250 mg L ⁻¹ NPs Se (E) 500 mg L ⁻¹ NPs Se (F) 0 mg L ⁻¹ NPs Se..... | 39 |
| Figura 4. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) en los parámetros de peso (A), diámetro (B) y longitud (C). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05). | 42 |
| Figura 5. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) en los parámetros de peso (A), diámetro (B) y longitud (C). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05). | 43 |
| Figura 6. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) en la concentración de ácido ascórbico. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05)..... | 46 |
| Figura 7. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) en la concentración de carotenoides amarillos (CA), carotenoides rojos (CR) y carotenoides totales (CT). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05). | 47 |
| Figura 8. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) en la concentración de clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) y clorofila total (Chl t). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05). | 49 |
| Figura 9. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) en el contenido de fenoles (A) y flavonoides (B). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05). .. | 50 |
| Figura 10. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) en la concentración de antocianinas. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05)..... | 51 |
| Figura 11. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) para la actividad antioxidante por el radical ABTS ^{•+} (A) y DPPH [•] (B). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05). | 53 |
| Figura 12. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) en la actividad enzimática de catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), | |

ascorbato peroxidasa (APx) y peroxidasa (POD). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$)..... 57

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Clasificación taxonómica de verdolaga..... | 13 |
| Cuadro 2. Efecto de las NPs Se sobre solidos solubles totales (°Brix) , pH, acidez titulable e índice de sabor (% ácido cítrico) en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.)..... | 45 |
| Cuadro 3. Efecto de las NPs Se sobre marcadores de daño en verdolaga (<i>Portulaca oleracea</i> L.) | 59 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1. Acidez titulable | 29 |
| Ecuación 2. Índice de sabor | 29 |
| Ecuación 3. Angulo hue..... | 30 |
| Ecuación 4. Croma | 30 |
| Ecuación 5. Antocianinas totales..... | 32 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1. Certificado de participación en “Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Hidalgo 2023” | 72 |
| Anexo 2. Trabajo en extenso de la participación en “Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Hidalgo 2023” | 73 |

1. RESUMEN

La verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) es considerada en algunas regiones del mundo como una maleza, pero en México se consume ampliamente dentro de la gastronomía mexicana, por lo cual, en los últimos años, se ha reportado un aumento en la producción. Sin embargo, se ha demostrado que la verdolaga cultivada presenta una disminución en su contenido nutrimental y fitoquímico en comparación con la verdolaga silvestre, reduciendo así su calidad intrínseca. Para contrarrestar ese efecto el presente trabajo tuvo como objetivo la aplicación de nanopartículas de selenio (NPs Se) a diferentes concentraciones (0, 5, 25, 50, 250, 500 mg L⁻¹) en cultivo de verdolaga producida en condiciones de invernadero y evaluar su efecto sobre las propiedades fisicoquímicas y antioxidantes enzimáticas y no enzimáticas al momento de la cosecha. Se encontró que verdolagas (NPs a 0 mg L⁻¹) presentaron un mayor peso (3.43 g) y longitud (151.30 mm), respecto a las tratadas con NPs de Se, sin embargo, las verdolagas tratadas con NPs Se mejoraron el índice de sabor hasta un valor de 1.34. Respecto a los compuestos bioactivos con actividad antioxidante, la aplicación de NPs Se a 250 mg L⁻¹, indujeron un mayor contenido carotenoides totales (2.72 mg g⁻¹ PS), clorofila total (33.53 mg g⁻¹ PS) y ácido ascórbico (3.51 mg g⁻¹ PS), respecto a las verdolagas control. Se encontró que la aplicación foliar a mayor concentración de Se (NPs Se 500 mg L⁻¹), tienen efecto positivo en la concentración de flavonoides (35.20 mg EQ g⁻¹ PS) y actividad antioxidante de acuerdo al ensayo de ABTS (57.03 μM de equivalentes de Trolox g⁻¹ PS). Los valores más altos de actividad antioxidante por DPPH (24.264 μM Trolox g⁻¹ PS) se observó en la aplicación de NPs Se a 5 mg L⁻¹. Las NPs de Se incrementaron la actividad del sistema de defensa antioxidante mediante las enzimas SOD, CAT, APX y POD y con un menor efecto de las enzimas PPO responsables del oscurecimiento enzimático y menor

presencia de malondialdehído como indicador de peroxidación lipídica. De acuerdo a lo encontrado en este estudio se recomienda la aplicación de nanopartículas de selenio a 250 mg L⁻¹ debido a que mejora el índice de sabor, a la concentración de compuestos antioxidantes y el reforzamiento del sistema antioxidante de las verdolagas resultando en una reducción de los daños por estrés oxidativo.

2. ABSTRACT

The purslane (*Portulaca oleracea* L.) is considered in some regions of the world as a weed, but in Mexico it is consumed widely, so an increase in production has been reported in recent years. However, cultured purslane has been shown to have a decrease in its nutritional and phytochemical content compared to wild purslane. To counteract this effect, the present study aimed to apply selenium nanoparticles (Se-NPs) at different concentrations (0, 5, 25, 50, 250, 500 mg L⁻¹) in purslane produced under greenhouse conditions and evaluate its effect on the enzymatic and non-enzymatic physicochemical and antioxidant properties at harvest. It was found that control purslane (NPs at 0 mg L⁻¹) presented a greater weight (3.43 g), length (151.30 mm), while the purslane treated with NPs improved in flavor index to a value of 1.34. For bioactive compounds with antioxidant activity, the application of Se-NPs at 250 mg L⁻¹ induced a higher total carotenoid content (2.72 mg g⁻¹ DW), total chlorophyll (33.53 mg g⁻¹ DW) and ascorbic acid (3.51 mg g⁻¹ DW) in purslane. It was found that the higher concentration of Se (Se-NPs 500 mg L⁻¹), the greater effect on flavonoid concentration (35.20 mg QE g⁻¹ DW) and antioxidant activity by ABTS with a value of 57.03 μM of TE g⁻¹ DW. The highest values of antioxidant activity by DPPH (24,264 μM Trolox g⁻¹ DW) were observed in the application of NPs Se at 5 mg L⁻¹. The NPs increased the activity of SOD, CAT, APX and POD with a better effect of the PPO and presence of malondialdehyde. The NPs increased the activity of the antioxidant defense system by the enzymes SOD, CAT, APX and POD and with a lower effect of the enzymes PPO responsible for enzymatic darkening and less presence of malondialdehyde as a sign of lipid peroxidation. According to what was found in this study the application of selenium nanoparticles at 250 mg L⁻¹ is recommended because it improves the taste index, to the concentration of antioxidant

compounds and the reinforcement of the antioxidant system of purslanes resulting in a reduction of oxidative stress damage.

3. INTRODUCCIÓN

La verdolaga (*Portulaca oleracea L.*) es una suculenta la cual es considerada como arvense o maleza en algunos países, con un amplio consumo en zonas de Europa, países Mediterráneos y en diversas regiones de la República Mexicana. Las partes aéreas de la verdolaga se utiliza como alimento y se pueden consumir crudas, cocidas o en escabeche la cual se caracteriza por tener un sabor ácido ligero, además se acostumbra su consumo en ensaladas, sopas y estofados, (Mohamed & Hussein, 1994).

En México de acuerdo a las estadísticas oficiales del SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) reportaron que para el 2022 la superficie nacional destinada para la producción de verdolaga fue de 389 ha, de las que se cosechó el 100 % con una producción total de 5175.49 t,33 con un rendimiento promedio de 13.30 t ha⁻¹ y con un valor de producción de poco más de 26 MDP. De los cuales los principales Estados productores de México son Ciudad de México, Estado de México, Morelos y Baja California. Debido a su importancia en la dieta y a su demanda la producción de verdolaga se ha ido realizando de manera extensiva reduciendo la colecta de verdolaga silvestre.

Hoy en día el consumo de alimentos vegetales es importante debido a la cantidad de compuestos bioactivos que contienen y que tienen un beneficio importante para la salud humana, y entre estos vegetales, la verdolaga se posiciona como una fuente importante de estos compuestos bioactivos, sin embargo, estos compuestos pueden variar por múltiples factores (Santiago-Saenz et al., 2018). De acuerdo con Nezmer et al., (2020), en un análisis comparativo entre verdolaga cultivada y silvestre identifico que los contenidos nutricionales y fitoquímicos varían, siendo la verdolaga silvestre la que arrojó mayor cantidad de estos compuestos esto debido al estrés biótico y abiótico bajo la que se produce. Por otra parte,

Lira-Saldivar et al., (2018), mencionan que el uso de nanopartículas de diferentes elementos que actúan como micronutrientes en las plantas pueden generar una estimulación de estrés similar a la que las plantas silvestres están sometidas y que provoca una mayor síntesis de compuestos bioactivos. Sin embargo, dicho estímulo depende del tipo de nanopartículas usado y del método de aplicación de estas. Además, se ha comprobado que la aplicación de nanopartículas con diferentes elementos metálicos como Cu, Fe, Ag, ZnO, Se, entre otros, favorece el incremento de compuestos bioactivos los cuales brindan beneficios importantes para la salud humana, teniendo así cultivos de mayor valor nutracéutico (Juárez-Maldonado et al., 2018).

Pese a la importancia que tiene la verdolaga, de sus compuestos bioactivos y propiedades biológicas, que contiene, no existen hasta el momento estudios sobre el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de selenio, sobre la calidad fisicoquímica, los compuestos bioactivos, capacidad antioxidante enzimática y no enzimática en el cultivo de verdolaga, por lo cual el presente trabajo pretendió evaluar la respuesta a la aplicación de NPs de Se en diferentes concentraciones.

4. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas Se (NPs Se) sobre la calidad fisicoquímica, la concentración de los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante enzimática y no enzimática en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) producida bajo condiciones de invernadero.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluación de parámetros fisicoquímicos (peso, longitud, diámetro, pH, sólidos solubles totales, acidez titulable) en verdolagas tratadas a diferentes concentraciones de NPs Se (0 mg L^{-1} , 05 mg L^{-1} , 25 mg L^{-1} , 50 mg L^{-1} , 250 mg L^{-1} y 500 mg L^{-1}).
- Determinación de compuestos bioactivos (fenoles, flavonoides, ácido ascórbico, carotenoides, clorofila y antocianinas) en verdolagas tratadas a diferentes concentraciones de NPs Se.
- Determinación de la capacidad antioxidante mediante el ensayo de ABTS^{•+} y DPPH[•] en verdolagas tratadas a diferentes concentraciones de NPs Se.
- Evaluación de la actividad de las enzimas SOD, CAT, APx y POD *in vitro* por el efecto de la aplicación de NPs Se a diferentes concentraciones en verdolagas.
- Determinar la concentración de malondialdehído, peróxido de hidrógeno y actividad de la PPO como efecto de daño por la aplicación de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolagas.

6. HIPÓTESIS

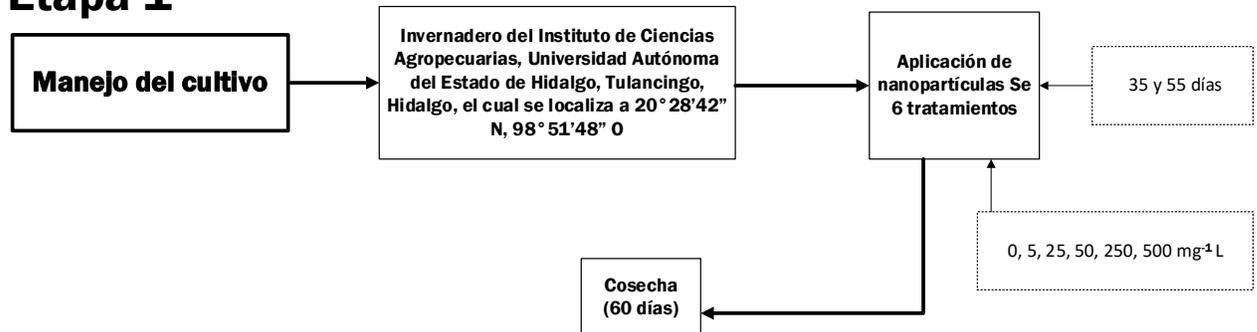
La aplicación foliar de NPs Se a diferentes concentraciones incrementan la calidad fisicoquímica, concentración de compuestos bioactivos y respuesta del sistema antioxidante enzimático en verdolagas.

7. JUSTIFICACIÓN

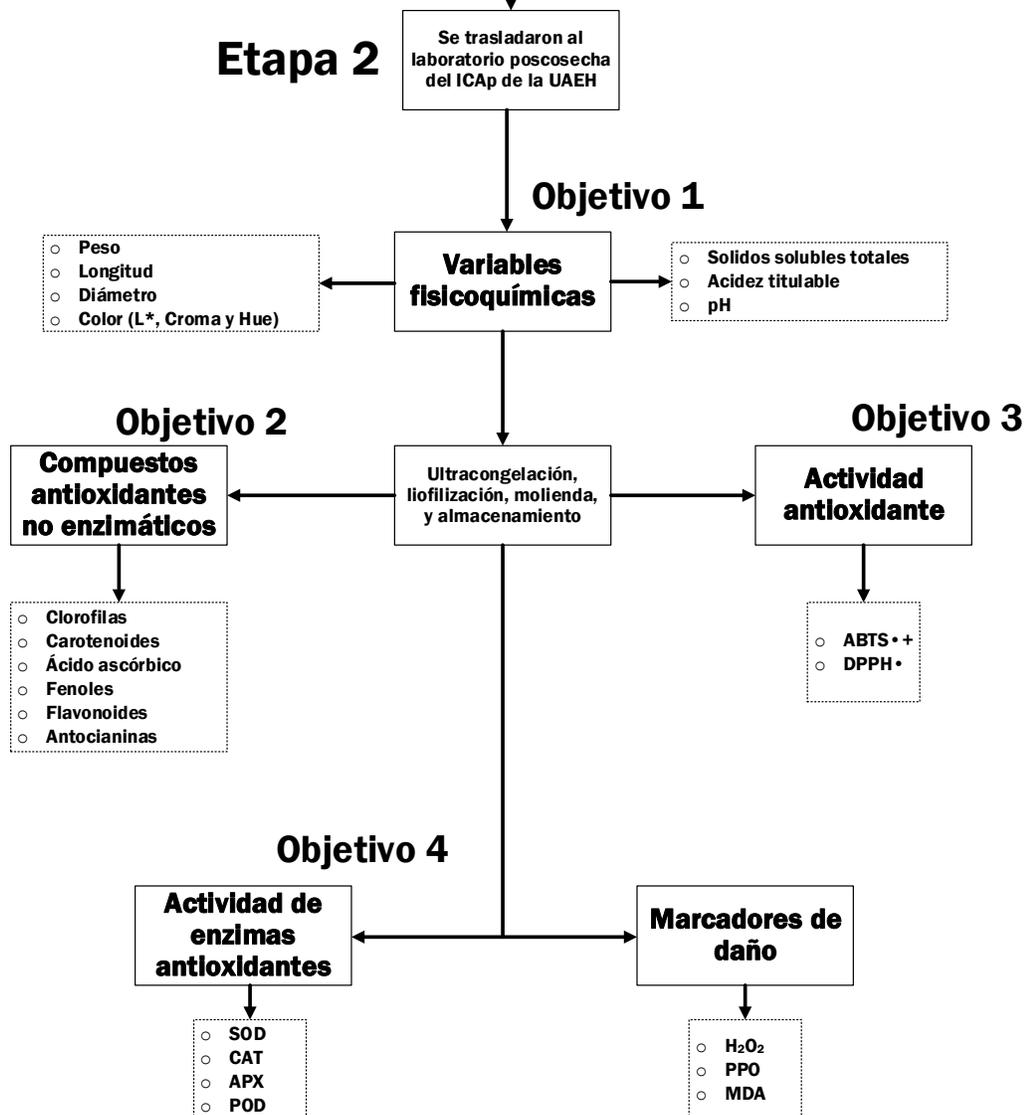
La verdolaga (*Portulaca oleracea L.*) es una planta nativa silvestre de México, se ha utilizado como alimento desde tiempos prehispánicos y forma parte de la dieta del mexicano, son capaces de adaptarse a climas adversos bajo condiciones de estrés oxidativo, promoviendo mecanismos de protección observándose en la acumulación de aminoácidos, síntesis de compuestos fenólicos y polisacáridos, entre otros. Sin embargo, se ha documentado que cuando esta se produce bajo condiciones de invernadero, estos compuestos decrecen considerablemente disminuyendo la calidad intrínseca de este producto. Al respecto se ha encontrado que la aplicación foliar de nanopartículas de Zn y Se, en diferentes cultivos pueden favor potenciando los compuestos bioactivos, la actividad antioxidante e incrementado la productividad. Por ello, se propone evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de Se sobre el contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante enzimática y no enzimática en verdolaga.

8. DIAGRAMA METODOLÓGICO

Etapa 1



Etapa 2



9. MARCO TEÓRICO

9.1. Taxonomía y morfología de la verdolaga

La verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) pertenece a la familia *Portulacáceae* y su clasificación taxonómica se muestra en la tabla 1. Es una planta anual, suculenta, extendida, ramificada, bastante glabra de 10-50 cm de largo. Los tallos son a menudo de color púrpura. Las hojas son carnosas y planas, obtusas, obovadas, base cuneada, de 1 a 2.5 cm de largo. Las flores son sésiles, axilares y las cabezas son cerradas o cimosas, los brotes comprimidos. Los pétalos son cinco, amarillos y tan largo como los sépalos con 8 a 12 estambres (Ross, 2003).

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de verdolaga

Reino: *Plantae*

Subreino: *Viridiplantae* (plantas verdes)

Infrareino: *Spermatophyta* (plantas terrestres)

Superdivisión: *Embryophyta*

División: *Tracheophyta* (plantas vasculares)

Subdivisión: *Spermatophytina* (plantas de semilla)

Clase: *Magnoliopsida* (dicotiledóneas)

Superorden: *Caryophyllidae*

Orden: *Caryophyllales*

Familia: *Portulacaceae*

Género: *Portulaca*

Especie: *Portulaca oleracea*

Nombre científico: *Portulaca oleracea* L.

Nombre común: Verdolaga

Fuente: National Library of Medicine

9.2. Importancia nutricional

9.2.1. Compuestos bioactivos

Se han identificado una amplia gama de compuestos bioactivos en verdolaga, entre lo que destacan los compuestos fenólicos tales como el kaempferol, quercetina, apigenina, ácido ferúlico, ácido rosmarínico (Cai et al., 2004; Erkan, 2012), ácido ascórbico, glutatión (Simopoulos et al., 2004), alcaloides (Liang et al., 2014; Xiang et al., 2005), y flavonoides como los homoisoflavonoides (Yan et al., 2012). Estas sustancias han exhibido una gran variedad de efectos benéficos a la salud entre los que se encuentran, la disminución del daño oxidativo (actividad antioxidante) (Al-Quraishy et al., 2012), de esta manera promueven la reducción de la incidencia en patologías como el cáncer (Zhao et al., 2018) y enfermedades cardiovasculares (Zidan et al., 2014). Sin embargo, la concentración de estos compuestos bioactivos puede variar de acuerdo al tipo de suelo y condiciones agroclimáticas (Jin et al., 2018; Shulaev et al., 2008).

9.2.1.1. Ácidos fenólicos

Los ácidos fenólicos son importantes metabolitos especializados que se encuentran en las plantas y que son derivados de los ácidos benzoico y cinámico (Chandrasekara, 2018). Son grupos de ácidos carboxílicos que poseen compuestos fenólicos (Kumar & Goel, 2019). En verdolaga se ha identificado un gran número de ácidos fenólicos como el ácido cafeico, ácido *p*-cumárico, ácido ferúlico, ácido gálico, ácido gentísico, ácido benzoico y ácido anísico (Sicari et al., 2018). Santiago-Saenz et al., (2018), mediante un análisis de cromatografía líquida de alta resolución cuantificaron (HPLC) la presencia de ácidos cafeico, gálico, vanílico, ferúlico y siríngico.

9.2.1.2. Flavonoides

Se han aislado de la verdolaga varios flavonoides como apigenina, kaempferol, luteolina, quercetina, isorhamnetina, kaempferol-3-O-glucósido y rutina (Sicari et al., 2018). Además, se han identificado cinco flavonoides, kaempferol, apigenina, miricetina, quercetina y luteolina mediante electroforesis capilar con detección electroquímica (Xu et al., 2006). Por otro lado, referente a los estudios a los efectos biológicos que se le atribuyen algunos estudios reportan el uso de quercetina aislada de verdolaga, la cual mejoró significativamente el aprendizaje y la memoria en ratones, lo que sugiere sus efectos neuroprotectores (Lu et al., 2006). También, se identificó la miricetina y la apigenina por HPLC en verdolaga (Santiago-Saenz et al., 2020).

9.2.1.3. Antocianinas

Las antocianinas son compuestos polifenólicos que se encuentran en las plantas como pigmentos de color rojo, púrpura o azul (Khoo et al., 2017). Las antocianinas también son muy importantes para la salud humana y se ha descubierto que desempeñan varias funciones beneficiosas contra una serie de enfermedades (Valavanidis & Vlachogianni, 2013). Algunas antocianinas que se han identificado en verdolaga son delphinidina-3,5-glucosido, cianidina-3,5-glucosido, pelargonidina-3,5-glucosido, delphinidina-3-glucosido, cianidina-3-glucosido y pelargonidina-3-glucosido (Martins et al., 2016).

9.2.1.4. Lignan

Los lignanos son polifenoles formados por la dimerización de monolignoles y juegan un papel defensivo en las plantas contra los microorganismos (Park et al., 2021). La literatura ha reportado algunos lignanos en verdolaga como: monometil 3,30,4,40-tetrahidroxi- δ -truxinato, siringaresinol, oleralignano, liriioresinol A, además se encontró que oleralignano

era un lignano completamente nuevo formado a partir de él. Por otro lado, el ensayo de eliminación del radical DPPH, sugirió que la presencia de los lignanos en verdolaga promueve una buena actividad antioxidante (Ma et al., 2020).

9.2.1.5. Terpenoides

Los terpenoides, también conocidos como isoprenoides, son compuestos orgánicos derivados del isopreno sintetizados en muchos organismos, incluidas las plantas (Tholl, 2015). Dentro de estos compuestos se ha aislado de verdolaga un portulano que se identificó como un nuevo diterpeno (Elkhayat et al., 2008). Así mismo, otros terpenoides identificados son portulosido A, portulosido B, portulano, lupeol, friedelan, taraxerol, ácido portaraxeroico A y ácido portaeaxeroico B siendo estos de importancia dado a su actividad antiinflamatoria y antitumoral (Mir & Ali, 2016).

9.2.1.6. Homoisoflavonoides

Los homoisoflavonoides (HIF) son otro grupo importante de metabolitos especializados que se encuentran en las plantas (Castelli & López, 2017). Se diferencian de los flavonoides ya que poseen un carbono adicional que está ausente en los flavonoides y hasta la fecha se han identificado más de 300 HIF en las plantas (Mir & Ali, 2016). Además, los homoisoflavonoides son conocidos por sus actividades antimicrobianas, antimutagénicas, antiinflamatorias, antidiabéticas y antioxidantes (Abaegaz et al., 2007). La verdolaga presenta HIF como el 5-hidroxi-7-metoxi-3-(20-hidroxibencil)-4-cromanona que ha mostrado efecto protector de las células β del páncreas ante la apoptosis producida por la glucosa lo cual sugiere actividad antidiabética (Duan et al., 2009).

9.2.2. Propiedades biológicas

9.2.2.1. Actividad antioxidante

Los cultivos de verdolaga se pueden utilizar como fuente de minerales y antioxidantes, especialmente para alimentos funcionales y aplicaciones nutraceuticas (Uddin et al., 2014). Los antioxidantes son metabolitos secundarios Así mismo, se demostró que el extracto metanólico de verdolagas en seis diferentes cultivares presentaron una fuerte actividad antioxidante (Lim & Quah, 2007). Se han aislado varios compuestos que han demostrado actividad antioxidante como lo son los alcaloides fenólicos como la oleracea a, b y e (Yang et al., 2018).

Asimismo, como las verdolagas contiene ácidos fenólicos, carotenoides, flavonoides, antocianinas, ácido ascórbico y ácidos grasos omega-3 como sus principales compuestos antioxidantes (Kumar et al., 2022). Por lo cual, se han estudiado los efectos antioxidantes de la verdolaga y se concluyó que es un producto natural prometedor para la prevención de enfermedades cardiovasculares, neurodegenerativas y otras crónicas provocadas por el estrés oxidativo (Mohamed et al., 2019).

9.2.2.2. Actividad antimicrobiana

Dentro de las propiedades antibacterianas y antifúngicas que presenta la verdolaga, El-Desouky, (2021) encontraron que al aplicar extracto acuoso obtenido de hojas a una concentración de 5 mg mL⁻¹ se presentó la mayor actividad inhibitoria zona de crecimiento para *A. flavus*, *A. ochraceus* y *A. parasiticus*. También, se aisló la apigenina, un flavonoide de la verdolaga y se probó sus propiedades antibacterianas contra ciertos patógenos bacterianos como *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterobacter aerogenes*, *Klebsiella pneumoniae* teniendo un mayor porcentaje de inhibición en comparación con estreptomicina

que se usó como control positivo y *Salmonella typhimurium* y *Proteus mirabilis* solo presentando un efecto bacteriostático (Nayaka et al., 2014).

9.2.2.3. Actividad antiinflamatoria

Con respecto a la actividad antiinflamatoria en verdolaga la literatura nos menciona varios estudios donde se demuestra su potencial como una alternativa a procesos inflamatorios que ocurren en los humanos (Kumar et al., 2022). El extracto etanólico al 10 % de las partes aéreas de la planta (hojas y tallos) muestra efectos antiinflamatorios y analgésicos significativos en comparación con el fármaco sintético diclofenaco sódico como ingrediente activo de control después de la administración intraperitoneal y tópica, pero no oral (Saheri et al., 2020). En el análisis realizado en amplia variedad de plantas con propiedades medicinales y se concluyó que la verdolaga tiene compuestos que le confieren propiedades antiinflamatorias (Jin et al., 2018).

Por otra parte, la verdolaga demostró resultados prometedores en un extracto acuoso contra el liquen plano oral, una enfermedad crónica e inmunomediada (Agha-Hosseini et al., 2010), además, el extracto acuoso tiene aplicaciones para regular positivamente la producción de citocinas antiinflamatorias (He et al., 2021).

9.2.2.4. Actividad antihipertensiva

Dentro de la literatura encontramos que la verdolaga presenta actividad antihipertensiva donde principalmente se ha informado que el extracto acuoso de *Portulaca oleracea* (hojas y tallos) producen una relajación del fondo dependiente de la dosis en conejillos de indias y constricción del yeyuno y la aorta del conejo (Mera-Ovando et al., 2011). También, se demostró que redujo la presión arterial de rata, el extracto etanólico produjo una respuesta de compresión dependiente de la dosis. Por lo tanto, el extracto puede actuar sobre la fracción

postsináptica α -adrenérgica e interferir con la entrada de calcio transmembrana (Parry et al., 1993).

9.2.2.5. Actividad antidiabética

Las investigaciones en verdolaga han demostrado un amplio beneficio en la salud humana diversos estudios han encontrado que presenta propiedades antidiabéticas (Kumar et al., 2022), como el efecto protección renal del extracto acuoso de verdolaga sobre la inflamación en ratones diabéticos tipo 2 con nefropatía acelerada debida a fibrosis renal posterior a este análisis se realizó en él estudió en pacientes diabéticos. El extracto redujo los niveles de glucosa en plasma y creatinina en la sangre, y disminuyó la ingesta de agua y la producción de orina. También, se concluyó que el extracto aliviaba la nefropatía diabética al inhibir la fibrosis renal y la inflamación en ratones (Lee et al., 2020). También, se probó el efecto de extracto acuoso en ratones diabéticos inducido por estreptozotocina mediante la prevención del estrés oxidativa ejerciendo efecto inmunomodulador (Samarghandian et al., 2017). Además, las semillas de verdolaga pueden ser eficaces y seguras como tratamiento complementario para la diabetes tipo 2 debido a su resistencia a los efectos reductores, hipoglucemiantes, hipolipemiantes y reductores de la insulina, posiblemente debido a su contenido de ácidos grasos poliinsaturados, flavonoides y polisacáridos (Mohamed et al., 2019).

9.2.3. Aplicaciones pecuarias

La verdolaga no solo se ha probado su uso fitoremediador en humanos; así mismo, Lin et al., (2014), reportaron el buen potencial de la verdolaga como fuente vegetal alternativa de ácidos grasos ω -3 y ω -6. Por lo cual con fines de mejorar la calidad de las gallinas ponedoras se adición de 20 g kg⁻¹ de verdolaga a la dieta redujo el peso corporal, aumentó la producción y

el peso de los huevos y la eficiencia alimenticia (Montoya-García, 2017). Esta adición aumentó significativamente el consumo humano de ácidos grasos omega 3 (C18: 3, ω -3 y C22: 6, ω -3), pero no modificó las concentraciones de colesterol en los huevos. Además, al adicionar 100 g kg⁻¹ o 200 g kg⁻¹ de verdolaga aumentaron el contenido de ácidos grasos ω -3 en las yemas de huevo sin afectar negativamente su calidad y rendimiento en gallinas Rhode Island Red (Tian et al., 2015).

9.2.4. Otras propiedades

En verdolaga también se han realizado investigaciones indican que es útil en la regeneración de ecosistemas, capaz de eliminar biotoxinas de un entorno acuático, incluida la micocistina-LR. convirtiéndolo en compuestos de baja toxicidad y tiene la capacidad de eliminar los derivados del bisfenol de los medios acuáticos. Esta tiene la capacidad de descontaminar además de ser ornamental. (Isobe et al., 2013).

Dado que existen cultivares, la verdolaga también se puede utilizar en jardinería ornamental con espectaculares exhibiciones de flores. Pero puede ser en agronomía donde tenga una aplicación más importante ya que con establecimiento de mantillo vivo estas presentan comportamiento interesante. Dando mayores beneficios que otros métodos cuando se utilizan plantas de *Portulaca oleracea*, que los mantillos típicos se utilizan en cultivos como el brócoli (Ellis et al., 2000). Se ha establecido que el cultivo de verdolaga como planta de acompañamiento funciona como biorremediador en condiciones de salinidad. En cultivos, los tomates absorben menos Na cuando se acompañan con verdolaga (Graifenberg, 2003). La verdolaga puede ofrecer más beneficios adicionales siendo un recurso novedoso para otros cultivos en los procesos de agricultura (Mohamed et al., 2019).

9.3. Nanotecnología

El uso de la nanotecnología en el sector agroalimentario ha desarrollado una herramienta novedosa que debido al crecimiento de la demanda de los alimentos han permitido competir, en una sociedad con incremento excesivo (Juárez-Maldonado et al., 2019). La nanotecnología ha mostrado tener una amplia gama de aplicaciones, en la elaboración de alimentos se ha utilizado como colorantes, preservantes, conservadores de sabor. Además, en el empaque de alimentos se ha implementado la nanotecnología para la detección de pesticidas y patógenos, detección de toxinas, películas comestibles, entre otras (Lira-Saldivar et al., 2018).

9.3.1. Nanopartículas

Las nanopartículas, son partículas ultrafinas de tamaño entre 1-100 nanómetros (Juárez-Maldonado et al., 2019); dependiendo de su tamaño, son similares a las moléculas biológicas tales como las proteínas; y son capaces de pasar a través de las membranas celulares. Estas membranas poseen poros cuyo diámetro se encuentra entre 5-20 nm, por lo tanto, las nanopartículas cuyo diámetro se encuentre dentro de esta escala atravesarán con mayor facilidad (Lira-Saldivar et al., 2018; Ruiz-Torres et al., 2016).

Su interés radica en que a escalas tan pequeñas se obtienen propiedades físicas y químicas bastante diferentes que a mayor tamaño. Los elementos químicos en forma de nanoescala o nanopartículas (NP) parecen ser diferentes de los elementos químicos en forma microscópica o macroscópica o en forma iónica. (Firdhouse et al., 2012).

Debido a sus propiedades únicas, las nanopartículas han ganado rápidamente importancia en muchos campos de la ciencia y la tecnología. Pues se utilizan en el sector agroalimentario,

especialmente para conservación y envasado, agricultura y gestión de la calidad del agua. Además, de presentarse como un área de oportunidad futura para el mejoramiento de la vida útil, la calidad de los alimentos, la seguridad y la fortificación. Las aplicaciones para la gestión de la calidad del agua incluyen partículas metálicas alimentadas con nanomadera, fotocatalisis, desalinización, eliminación de metales pesados y nanosensores inalámbricos (Al-Otibi et al., 2022).

9.3.1.1. Nanopartículas de selenio (Se)

Se ha demostrado que la aplicación de nanopartículas de selenio (NPs SE) mejora la biomasa, así como el rendimiento de las hortalizas de algunos cultivos (Gudkov et al., 2020), además de aumentar la cantidad de pigmentos fotosintéticos en hojas lo cual mejora la fotosíntesis en hojas. La aplicación de nanopartículas de Se en hortalizas bajo condiciones de estrés salino puede incrementar de manera sinérgica el contenido de fenoles, flavonoides, β - caroteno y clorofila (Lin & Wang, 2005). También, pueden alterar el sistema antioxidante, regular los niveles de expresión genética e influir en el metabolismo de las plantas (Manojlović et al., 2019).

Por otra parte, el uso de nanopartículas de selenio como remediación en cultivos de *Abelmoscus esculentus* tratados con aguas y suelos residuales de minas de oro mostrando un aumento en compuestos lipofílicos, reduciendo el porcentaje de actividad antioxidante por el radical DPPH (Azeez et al., 2023). Así mismo, Sheikhalipour et al., (2023), utilizaron nanopartículas de selenio y quitosano (NPs Se-C) para revertir los efectos nocivos del estrés salino en el crecimiento, concentración de nutrientes y los niveles de transpiración en *Momordica charantia*. También, en un estudio previo en melón amargo (*Momordica charantia*) aplicando NPs Se-C encontraron aumento en el rendimiento y la actividad

enzimática y no enzimática, así mismo redujo el contenido de peróxido de hidrógeno y malondialdehído (Sheikhalipour et al., 2021).

De acuerdo con El-Saadony et al., (2021) menciona que el uso de nanopartículas de selenio para combatir enfermedades de pudrición de la corona y raíz inducidas por especies de *Fusarium* que afectan los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) mejoran el crecimiento de la planta, los pigmentos fotosintéticos y los parámetros de intercambio de gases, también, influyeron sobre la calidad y cantidad de granos que produjo el trigo. Así mismo, en plántulas de maíz (*Zea mays* L.) con aplicación foliar de nanopartículas de selenio se encontró que aumentaron las concentraciones de metabolitos promoviendo a su vez el crecimiento de las plántulas, mejoraron el metabolismo de glutatión, carbono y nitrógeno (Wang, et al., 2023a).

En relación al uso de nanopartículas de selenio (NPs Se) en maíz (*Zea mays* L.) en suelos con presencia de cadmio (Cd). Wang, et al., (2023b), encontraron que la aplicación de NPs Se redujo el contenido de Cd, mejoro la actividad antioxidante, reprogramo el metabolismo de los carbohidratos y el transporte de membrana para mejorar el crecimiento del maíz. También, se encontró que en frijol mungo (*Vigna radiata*) aumentaron el número de vainas, el número de semillas por la aplicación de nanopartículas de selenio, así mismo, en el grano mejoró el peso, la acumulación de cerio (Ce) disminuyó, el rendimiento, pero redujo el contenido de proteína (Kamali-Andani et al., 2023).

La literatura nos menciona que el selenio en nanopartículas puede interactuar y remplazar la absorción de otros elementos esenciales en plantas (de Oliveira et al., 2019). Al aplicar en *Phaseolus vulgaris* nanopartículas de dióxido de selenio aumentó la concentración de nitrógeno, fosforo y hierro (Rady et al., 2021). En relación a esto, (Hussain et al., 2020), aplicaron NPs Se como una estrategia eficaz para prevenir la disminución de calidad y

rendimiento en arroz (*Oryza sativa* L.) en suelos bajo estrés por metales pesados (cadmio y plomo). Así mismo, en *Brassica napus* sometidas a estrés producido por arsénico aplicadas con nanopartículas de melatonina y selenio, encontraron que mejoran la capacidad antioxidante no enzimática, sino que también mejora la capacidad de eliminación de los radicales libres ocasionados por la presencia de metales pesado (Farooq et al., 2022).

Las nanopartículas de selenio a su vez, aparte de las interacciones con las plantas podrían cambiar la comunidad microbiana de los suelos y enriquecer la presencia de bacteria benéficas integrando el equilibrio suelo-planta los cultivos de pimiento (Li et al., 2022). También, se ha utilizado para mitigar los daños por estrés salino en algunos cultivos, las nanopartículas de selenio podrían aumentar la absorción del agua en semillas durante la germinación, de esta manera, estimulo los pigmentos fotosintéticos, y ajusto la presión osmótica en la célula manteniendo la eficiencia de la fotosíntesis. A su vez, la actividad antioxidante se elevó y proporcionando mejoras en el proceso de protección (El-Badri et al., 2021). Además, en fertilización al suelo las nanopartículas de selenio en tomate en bajas concentraciones presentaron efecto antifúngico rápido y eficaz contra *Botrytis cineria*, también mejoraron el crecimiento y la actividad fotosintética (Yuan et al., 2022).

En otro estudio, se encontró que el uso de NPs Se podría generar una estimulación de fitohormonas para modular los procesos de biosíntesis de hormonas vegetales, observable en la eficiencia del enraizamiento, la altura de la planta, la longitud de las hojas, la biomasa de las plántulas, el contenido total de clorofilas, también se vio mejorado el sistema antioxidante enzimático mejorando el sistema de defensa de la planta al estrés ambiental y aumentando la tasa de supervivencia en gerberas (Khari et al., 2022). Sin embargo, se reporta en la mayoría de los estudios donde se usan nanopartículas de selenio que hay una concentración en la cual

puede representar toxicidad a las plantas, pero esto dependerá del tipo de cultivo que se esté manejando y las condiciones a las que este sometido como lo son estrés biótico y abiótico, sin embargo, se empiezan a considerar como una alternativa viable para su uso en la agricultura, despertando el interés sobre su correcta implementación (Song et al., 2023).

10. MATERIALES Y MÉTODOS

10.1. Localización del experimento

El trabajo de investigación se llevó a cabo en el invernadero del laboratorio de poscosecha del Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en Tulancingo de Bravo, Hidalgo, el cual se localiza a 20°28'42" N, 98°51'48" O y a una altura de 2181 msnm.

10.2. Material vegetal y nanopartículas

Se utilizaron semillas de verdolaga de marca vitalfoods ® semillas para huerto o jardín ecológicas. Las nanopartículas de Selenio (NPs Se) se obtuvieron del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) Saltillo, Coahuila.

10.3. Establecimiento del experimento

Las semillas se sembraron en charolas de unicele de 200 cavidades rotuladas por tratamientos. El sustrato utilizado para la siembra fue una mezcla de peat moss (kekkila profesional ®) y perlita (Agrolita ®) en relación 1:1 (v/v). El sustrato se mezcló y posteriormente se humedeció hasta el punto de saturación con agua. Después, se llenaron las charolas con la mezcla del sustrato y finalmente, se realizó la siembra depositando una semilla por cavidad, con una profundidad de siembra de aproximadamente 1 mm.

15.3.1. Riego

Los riegos durante la germinación se realizaron por medio de un aspersor manual, con una pulverización fina, y se aplicaron un riego por mañana (08:00 h) y otro por la tarde (18:00 h).

15.3.2. Manejo del cultivo

Se aplicó una solución Steiner la cual fue preparada utilizando nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), sulfato de magnesio (MgSO_4), nitrato de potasio (KNO_3), sulfato de potasio (K_2SO_4), fosfato monopotásico (KH_2PO_4) y Quelatos al 25% hasta obtener el primer par de hojas verdaderas, y posteriormente la concentración aplicada solución fue modificada al 100%.

10.4. Diseño de tratamientos

El experimento se realizó con diferentes concentraciones de Se y un testigo; el diseño fue de la siguiente manera: T1 = 0 mg L⁻¹ NPs Se, T2 = 05 mg L⁻¹ NPs Se, T3 = 25 mg L⁻¹ NPs Se, T4 = 50 mg L⁻¹ NPs Se, T5 = 250 mg L⁻¹ NPs Se y T6 = 500 mg L⁻¹ NPs Se.

La aplicación foliar de las nanopartículas de Selenio (NPs Se) se realizó a los 35 y 50 días después de la siembra. Se aplicaron aproximadamente 50 mL por charola.

10.5. Cosecha y preparación de las muestras

Se cosecharon las plantas de verdolaga a los 60 días después de la siembra, antes de que inicie la floración. Una vez cosechadas se trasladaron al laboratorio Poscosecha del ICAp-UAEH y se seleccionaron procurando que no tuvieran daños físicos; posteriormente se lavaron con agua destilada para proceder a realizar las determinaciones fisicoquímicas (altura y diámetro de la planta, peso, sólidos solubles totales, acidez titulable, pH y color).

Para la evaluación de las propiedades funcionales y capacidad antioxidante, las muestras de verdolaga se almacenaron a -76°C (Ultracongelador THERMO SCIENTIFIC ®, 303) durante una semana. Después, se liofilizaron (LABCONCO®, Modelo 79480, Kansas City, MO, EUA) a una presión de vacío de 133×10^{-3} mBar y una temperatura de -40°C . En seguida, las muestras se molieron en un molino de cuchillas (Haan®, RTSCH GM 200, Alemania) a 9000 rpm durante 60 segundos. Finalmente, las muestras se empacaron en bolsas herméticas negras y se almacenaron a 5°C hasta su procesamiento.

10.6. Variables de estudio

10.6.1 Determinaciones fisicoquímicas

10.6.1.1 Longitud y diámetro

Se midió de base a punta posicionado verticalmente las verdolagas para medir la longitud y un vernier digital (Mitotoyo, Digimatic Caliper).

10.6.1.2 Peso

Se pesaron las partes áreas (hojas y tallo), con una báscula digital (Ohaus Pro, modelo Scout Pro SP2001).

10.6.1.3 Sólidos solubles totales o grados Brix ($^{\circ}\text{Brix}$)

Para la determinación de grados $^{\circ}\text{Brix}$, se utilizó el refractómetro digital (ATAGO, PR-101, CO LTD) y se expresó como porcentaje de sólidos solubles totales (SST) (AOAC, 2005).

10.6.1.4 pH

Se determinó mediante un potenciómetro digital (Hanna Instruments, Modelo HI 2211, Romania) (AOAC, 2005).

10.6.1.5 Acidez titulable

Acidez titulable se evaluaron de acuerdo a la metodología de la AOAC (2005), expresando los datos como porcentaje de ácido cítrico. El cálculo se realizó con base a la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Acidez titulable

$$\% \text{ Ácido Cítrico} = \frac{(\text{mL NaOH})(N)(\text{meq})(VT)(100)}{(A)(g)}$$

Donde:

mL NaOH: gasto de NaOH usados en la titulación

N: Normalidad química de NaOH

Meq: miliequivalente de ácido cítrico

P: peso de la muestra utilizada (g)

A: alícuota del jugo (mL)

VT: volumen total

10.6.1.6 Índice de sabor

Se determinó mediante la ecuación propuesta por Hernández-Suárez et al., (2008).

Ecuación 2. Índice de sabor

$$\text{Índice de sabor} = \frac{(\text{° Brix})}{(20)(AT)} + AT$$

donde:

° Brix: grados brix

AT: acidez titulable

10.6.1.7 Color

Las mediciones de color se realizaron en un colorímetro (Minolta, CM-508d, Osaka, Japón). Se obtuvieron los parámetros de color L^* , a^* , b^* . Los valores a^* (verde valores negativos a rojo valores positivos) y b^* (amarillo valores positivos a azul valores negativos) se utilizaron para calcular el ángulo Hue (h°) y el valor de croma (C). Para el cálculo de h° y C, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3. Angulo hue

$$h^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

Ecuación 4. Croma

$$C = \sqrt{a^*^2 + b^*^2}$$

10.6.2 Compuestos bioactivos

10.6.2.1 Fenoles totales

Los fenoles totales se determinaron por el método de Folin-Ciocalteu descrito por Waterman et al. (1994). Del sobrenadante de cada una de las muestras se tomaron 0.5 mL del extracto y se agregó el reactivo de Folin-Ciocalteu diluido con agua destilada, se dejó reposar por 7 min, se agregó 1.5 mL de carbonato de sodio al (7.5%) y agua destilada, posteriormente se dejó reaccionar en completa oscuridad durante 1 h. finalmente se midió espectrofotométricamente la absorbancia a 725 nm (espectrofotómetro UV-Vis, Jenway, 6715, EUA). Se elaboro una curva de calibración con una solución patrón de ácido gálico a una concentración (1000 mg L^{-1}). Los resultados se expresaron en mg EAG g^{-1} de peso seco (PS).

10.6.2.2 Flavonoides

El contenido de flavonoides se determinó de acuerdo al método de Sánchez-Rodríguez et al. (2012), para ello se tomaron 0.5 mL del extracto, se le agregó 2 mL de agua destilada, más 0.15 mL de NaNO_2 (5%) la mezcla se reposó durante 5 min en la obscuridad y se agregaron 0.15 mL de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ al (10%) y 1 mL de NaOH (1M), esta solución se dejó reposar por 15 min. Se midió espectrofotométricamente la absorbancia a 415 nm (espectrofotómetro UV-Vis, Jenway, 6715, EAU). El contenido total de flavonoides se determinó usando una curva estándar de quercetina. Los resultados se expresaron mg EQ g^{-1} peso seco (PS).

10.6.2.3 Ácido ascórbico

La determinación del ácido ascórbico se realizó por el método de Klein & Perry, (1982). La muestra se mezcló con 10 mL ácido metafosfórico durante 45 min a 4°C en agitación constante, se centrifugó a 5000 xg. Del sobrenadante se tomó 1 mL, se mezcló con ácido 2,6-diclorofenol-indofenol, posteriormente se midió la absorbancia a 515 nm. Los resultados se expresaron como mg EAA g^{-1} peso seco (PS).

10.6.2.4 Carotenoides

Los carotenoides se determinaron de acuerdo a la metodología propuesta por Fish et al., (2002). En un vial ámbar se agregó 5 mL de BHT (Butilhidroxitolueno) al 0.05% (p/v) en acetona, 5 mL de etanol al 95% y 10 mL de hexano. Después, se añadió 0.1 g de muestra liofilizada, se mezclaron por medio de agitación a 180 rpm durante 15 min. Posteriormente, se agregaron 3 mL de agua destilada y se agitaron las muestras nuevamente durante 5 min. Finalmente, las muestras se dejaron en reposo durante 5 min a temperatura ambiente. La medición se realizó espectrofotométricamente de absorbancia se realizó a 508 nm para carotenoides rojo y 475 nm para carotenoides amarillos (espectrofotómetro UV-Vis, Jenway,

6715, EUA). Los valores de medición de carotenoides rojos y amarillos se expresaron en mg g⁻¹ peso seco (PS).

10.6.2.5 Clorofila

Se determinó la clorofila a, b, y total (Chl a; Chl b; Chl t) de acuerdo a la metodología descrita por Feung et al. (1971) ., El solvente utilizado para la preparación de la muestra fue acetona al 80%. La absorbancia de la muestra se midió espectrofotométricamente a 645 y 663 nm (espectrofotómetro UV-Vis, Jenway, 6715, EUA). Los resultados se reportaron en mg de clorofila por g de peso seco (PS).

10.6.2.6 Antocianinas

Para la determinación de antocianinas se empleó el pH diferencial de acuerdo a Giusti & Wrolstad, (2001). Se prepararon reactivos de cloruro de potasio a 0.025 M (pH de 1.0) y buffer de sodio a 0.4 M (pH de 4.5). Se tomaron 500 µL de la muestra y se vertieron en 2 tubos con capacidad de 15 mL con los reactivos: El tubo No. 1 con 4.5 mL de cloruro de potasio y en el tubo 2 con 4.5 mL de acetato de sodio. Posteriormente se agitaron en un vortex para dejarlos en reposo a 25 °C durante 15 min. Luego se tomaron 200 µL de cada tubo para su lectura. La absorbancia se midió a 510 nm y 700 nm (Espectrofotómetro, UV-Vis, Jenway, 6715, EUA) para ambos tubos, en donde se empleó la siguiente ecuación para el cálculo de antocianinas:

Ecuación 5. Antocianinas totales

$$\text{Antocianinas totales } \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A * MW * DF * 10,000)}{(\epsilon * Tc)}$$

Donde:

A: absorbancia de la resta entre valores (510–700 nm) correspondiente a cloruro de potasio menos la absorbancia de la resta de valores (510–700 nm) de acetato de sodio

MW: tamaño de cianidina-3-glucósido (449.2 g/mol)

DF: factor de (1:100)

ϵ : de absorptividad molar (26,900 L/cm/mg)

Tc: tamaño de la celda (1 cm).

10.6.3 Actividad antioxidante no enzimática

10.6.3.1 Método DPPH[•] (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo)

Para determinar la actividad antioxidante por medio de DPPH[•] se utilizó la metodología propuesta por Brand-Williams et al. (1995). Se preparó una disolución etanólica al 6×10^{-5} M de DPPH[•] la cual se colocó en agitación constante durante 2 horas en completa oscuridad. Posteriormente a una muestra del sobrenadante se le agregaron una concentración conocida de la disolución metanólica con DPPH, se agitó durante 15 s y se dejaron en reposo en completa oscuridad por un lapso de 1 h a 4°C, posteriormente se midió espectrofotométricamente la absorbancia a 517 nm (espectrofotómetro UV-Vis, Jenway, 6715, EUA). Para la obtención de resultados se preparó una curva patrón de Trolox. Los resultados se expresaron como $\mu\text{mol ET g}^{-1}$ de peso seco (PS).

10.6.3.2 Método de ABTS^{•+} [2,2'-azino-bis (ácido 3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico)]

La actividad antioxidante mediante ABTS^{•+}, se determinó por el método descrito por (Re et al., 1999). El radical ABTS^{•+} se produjo de la siguiente manera: se mezcló una solución 7

mM de ABTS^{•+} con persulfato de potasio 2.45 mM, la mezcla se mantuvo en agitación constante y a temperatura ambiente en la oscuridad durante 16 horas. La solución de ABTS^{•+} se diluyó en metanol absoluto hasta obtener una absorbancia de 0.7 ± 0.02 a 734 nm. Se mezcló la muestra con cantidad conocida de la solución de ABTS^{•+} diluido y se dejó reposar durante 6 min. Transcurrido el tiempo se midió la absorbancia a 734 nm (espectrofotómetro, modelo 6715 UV/Visible, Jenway, Techne Inc, EUA). Para la obtención de resultados se preparó una curva patrón de 0 a 15 μM de Trolox. Los resultados se expresaron como $\mu\text{mol ET g}^{-1}$ de peso seco (PS).

10.6.4 Actividad antioxidante enzimática

10.6.4.1 Actividad del superóxido dismutasa (SOD; EC 1.15.1.1)

La actividad superóxido dismutasa, se evaluó de acuerdo al método propuesto por Balois-Morales et al., (2007). Se mezcló una muestra de verdolaga conocida con 5 mL de una solución extractora de buffer de fosfatos, pH 7.8 a 0.05 M, la cual fue centrifugada a 10,000 xg durante 15 minutos a 4 °C. La mezcla para la determinación de la SOD consistió en sobrenadante, buffer de fosfatos, pH 7.8, 0.05 M, EDTA 0.1 mM, L-metionina 12 mM, NBT 0.075 mM y riboflavina 0.002 mM. Esta mezcla se dejó reaccionar por 15 min con una lámpara con luz fluorescente de 20 watts, pasado el tiempo se procedió a leer las absorbancias a 560 nm. El contenido de proteínas se determinó mediante el método de Bradford (1976), utilizando albúmina de suero bovino (BSA) como estándar. Los resultados se expresaron en unidades internacionales por gramo de proteína (U mg^{-1} de proteína), donde 1 U es la cantidad de enzima necesaria para causar el 50% de la inhibición de la reducción de NBT.

10.6.4.2 Actividad de la catalasa (CAT; EC 1.11.1.6)

La actividad de la catalasa, se determinó de acuerdo al método descrito por Balois-Morales et al., (2007), con algunas modificaciones. A una muestra liofilizada, se añadieron 5 mL de una solución tampón de fosfato de sodio 25 mM, pH 7.8, posteriormente fue centrifugado a 10,000 xg a 4 °C durante 15 minutos. La mezcla de reacción consistió en buffer de fosfatos 25 mM, pH 7.8, EDTA 0.8 mM, extracto enzimático (sobrenadante) y H₂O₂ a 20 mM. El cambio de absorbancia fue registrado durante 3 min a 240 nm. Los resultados se expresaron en unidades internacionales por gramo de proteína (U mg⁻¹ de proteína).

10.6.4.3 Actividad del ascorbato Peroxidasa (APx; EC 1.11.1.11)

Se determinó la actividad de la enzima ascorbato peroxidasa de acuerdo al método propuesto por Proietti et al., (2013), con ligeras modificaciones. Para la extracción de la enzima se utilizó buffer de potasio 50 mM, pH 7.0, el cual fue mezclado con una muestra conocida de verdolaga liofilizada posteriormente fue centrifugada a 12,000 xg durante 20 minutos a 4 °C. Para la reacción se mezcló buffer de potasio, pH 7.0, 50 mM, ascorbato sódico 10 mM, extracto enzimático y H₂O₂ a 30 mM. Se evaluó el cambio de absorbancia a 290 nm, durante 2 min a 25 °C, en un espectrofotómetro (modelo 6715 UV/Visible, Jenway, Techne Inc, EUA). La actividad APX fue calculada en base al coeficiente de extinción molar del ascorbato (2.8 mM⁻¹ cm⁻¹). Los resultados se reportaron en unidades internacionales por gramo de proteína (U mg⁻¹ de proteína).

10.6.4.4 Actividad del guayacol Peroxidasa (POD; EC 1.11.1.7)

La cuantificación de la actividad de la peroxidasa, se realizó por la oxidación del guayacol a tetraguayacol, de acuerdo al método descrito por Vanegas-Cano et al., (2022). La mezcla de reacción consistió en una mezcla de buffer de fosfatos 100 mM pH 5.0, guayacol 40 mM,

H₂O₂ 40 mM y extracto enzimático. La formación de tetraguayacol, fue registrada cada 10 s durante 3 min a una longitud de onda de 470 nm. Los resultados se expresaron en unidades internacionales por gramo de proteína (U mg⁻¹ de proteína).

10.6.4.5 Actividad de la polifenoloxidasasa (PPO; E.C. 1.14.18.1 y E.C. 1.10.3.1)

La determinación de la actividad de la polifenoloxidasasa se realizó de acuerdo al método propuesto por Vanegas-Cano et al., (2022) . Para la reacción, se mezcló una muestra conocida del sobrenadante con 2.2 mL del catecol 100 mM en buffer de fosfatos de sodio pH 6.5 100 mM. La actividad de la PPO, se siguió por la oxidación del catecol a o-diquinona a una longitud de onda de 470 nm durante 3 min. Los resultados se expresaron en unidades internacionales por miligramo de proteína (U mg⁻¹ de proteína)

10.6.4.6 Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂)

La determinación del peróxido de hidrógeno, se realizó de acuerdo a Junglee et al., (2014). Se utilizó una solución de extracción-reacción, la cual consistió en una mezcla conocida de muestra liofilizado con buffer de fosfatos de sodio 10 mM pH 7, ácido tricloroacético 0.1%, y yoduro de potasio 1M, la cual fue sometida a un baño ultrasónico (modelo 08895-09, Cole-Parmer, EUA), por 10 min a 40 kHz posteriormente se centrifugó a 10,000 xg durante 10 minutos. Las muestras se dejaron reaccionar por 20 min más a temperatura ambiente (20-22 °C), pasado el tiempo se midieron las absorbancias a una longitud de onda de 390 nm. Los resultados se expresaron en nanomoles de H₂O₂ por gramo de peso seco (nmol g⁻¹ PS).

10.6.4.7 Peroxidación lipídica

La peroxidación de los lípidos se evaluó mediante la cuantificación de la concentración de malondialdehído (MDA), siguiendo el método de Pasquariello et al., (2015), con algunas

modificaciones. Muestras liofilizadas de verdolaga, se mezclaron con ácido tricloroacético al 10% (p/v). La solución se calentó en un baño de agua en ebullición por 10 min, pasado el tiempo se bajó la temperatura de la muestra a temperatura ambiente y posteriormente fueron centrifugadas a 15,000 xg durante 10 minutos a 4°C. El sobrenadante se mezcló con una solución de ácido tricloroacético al 15%, que contenía 0.5% de ácido tiobarbitúrico (C₄H₄N₂O₂S). La absorbancia fue medida a 535 nm. La actividad de MDA fue calculada en base al coeficiente de extinción molar de 1.56 mM⁻¹ cm⁻¹. Los resultados se expresaron en milimoles de malondialdehído por gramo de peso seco (mM MDA g⁻¹ PS).

10.6.5 Análisis de resultados

Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar, tres repeticiones por tratamiento y se realizó el análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de medias de Fisher (LSD) con P≤0.05 el programa SAS (Statistical Analysis System, 2002) versión 9 fue utilizado.

11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el desarrollo en el invernadero se logró observar en las verdolagas que el proceso de germinación se redujo de 3 a 4 días (Figura 1, B), de acuerdo a lo reportado por Montoya-García et al., (2018) donde menciona que el brote de la semilla se presenta entre los 7 a 10 días después de la siembra (Figura 1. D) lo cual se debe al efecto que mejora las condiciones, como la temperatura y humedad beneficiando el que emergieran las semillas y estimulando su crecimiento. Sobre el porcentaje de germinación Montoya-García et al., (2017) menciona que en verdolagas se espera un 80 a 85 %, siendo mayor al 95 % el porcentaje que se obtuvo en esta investigación.

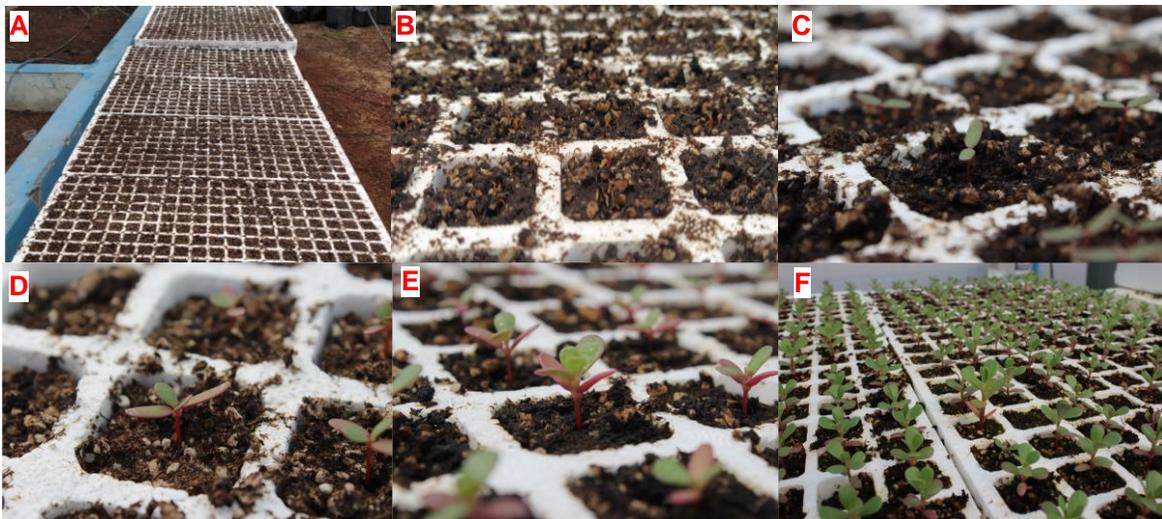


Figura 1. Crecimiento de verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) a los días 0 (A), 3 (B), 7 (C) 15 (D), 22 (E) y 35 (F)

Se observó que al día 15 empezaron a emerger el primer par de hojas verdaderas siendo este un índice que permite conocer que el desarrollo de las plántulas es el adecuado. También, para el día 35 (Figura 1, F) previo a la aplicación de NPs Se, se observó que las verdolagas tenían un crecimiento similar.

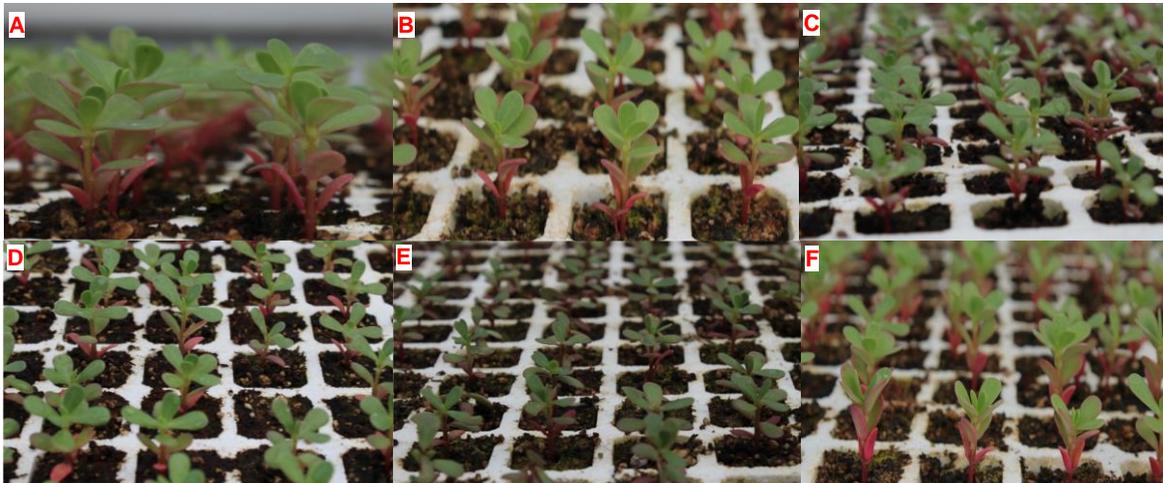


Figura 2. Crecimiento de verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) posterior a la primera aplicación foliar de (A) 5 mg L⁻¹ NPs Se (B) 25 mg L⁻¹ NPs Se (C) 50 mg L⁻¹ NPs Se (D) 250 mg L⁻¹ NPs Se (E) 500 mg L⁻¹ NPs Se (F) 0 mg L⁻¹ NPs Se

Posterior a la primera aplicación, se observó que las verdolagas tratadas con NPs Se a 500 mg L⁻¹ (Figura 2, E) fueron las únicas que presentaron daño en su estructura tanto en hoja como en los tallos por la concentración, esto sugiere que la cantidad de NPs Se promueven un mecanismo de toxicidad en las verdolagas.



Figura 3. Crecimiento de verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) posterior a la segunda aplicación foliar de (A) 5 mg L⁻¹ NPs Se (B) 25 mg L⁻¹ NPs Se (C) 50 mg L⁻¹ NPs Se (D) 250 mg L⁻¹ NPs Se (E) 500 mg L⁻¹ NPs Se (F) 0 mg L⁻¹ NPs Se

En la Figura 3, se observó que el crecimiento de las verdolagas posterior a la segunda aplicación de NPs Se, visualmente es homogéneo exceptuando las verdolagas de 500 mg L⁻¹ donde a pesar del daño que se presentó posterior a la primera aplicación alcanzo a regenerarse las partea áreas (hojas y tallo) , esto puede deberse a la tolerancia que la verdolaga tiene a los metales pesado como cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), mercurio (Hg) y plomo (Pb) (Dwivedi et al., 2012). Esto concuerda con Thalassinos et al., (2021), donde se evaluó verdolaga sometida durante un periodo de 50 días en suelos contaminados con Cr, observándose una reducción del Cr que se encontró principalmente acumulado en la raíz de la verdolaga y en concentraciones bajas en los tejidos de las partes aéreas (tallos y hojas).

11.1. Comportamiento en propiedades fisicoquímicas verdolaga por efecto de la concentración de nanopartículas de selenio

11.1.1. Variación en dimensiones (peso, longitud y diámetro)

Los parámetros de peso (A), longitud (B), diámetro (C) se presentan en la Figura 4 donde se puede observar que sin aplicación de nanopartículas de selenio (0 mg L⁻¹ NPs Se) las verdolagas presentaron mayor rendimiento en comparación con los demás tratamientos sometidos a la aplicación de nanopartículas de selenio (NPs Se), estos resultados eran los esperados ya que el efecto de invernadero incrementa el rendimiento de las hortalizas, pero con la aplicación de NPs Se estos parámetros se ven afectados ya que generan estrés. Por su parte Prabha et al., (2015) investigaron la acumulación y absorción de selenio (Se) donde a mayor concentración de Se menor es el crecimiento de las plantas de verdolaga dado que su capacidad de absorción de este micronutriente es alta.

Por otro lado, referente al peso (Figura 4, A) el tratamiento 0 mg L^{-1} NPs Se con un promedio de 3.43 g, con un diámetro (Figura 4, C) promedio de 3.22 mm y una longitud (Figura 4, B) promedio de 151.30 mm siendo este el mejor en rendimiento de las verdolagas. También, se observó que la verdolaga al ser una planta con propiedades biorremediadoras tiene a acumular mayor cantidad de metales, lo cual inhibe sus capacidades de crecimiento comparadas con otras de su mismo género como *P. tuberosa*, presentando un efecto de reducción en el rendimiento (Dwivedi et al., 2012).

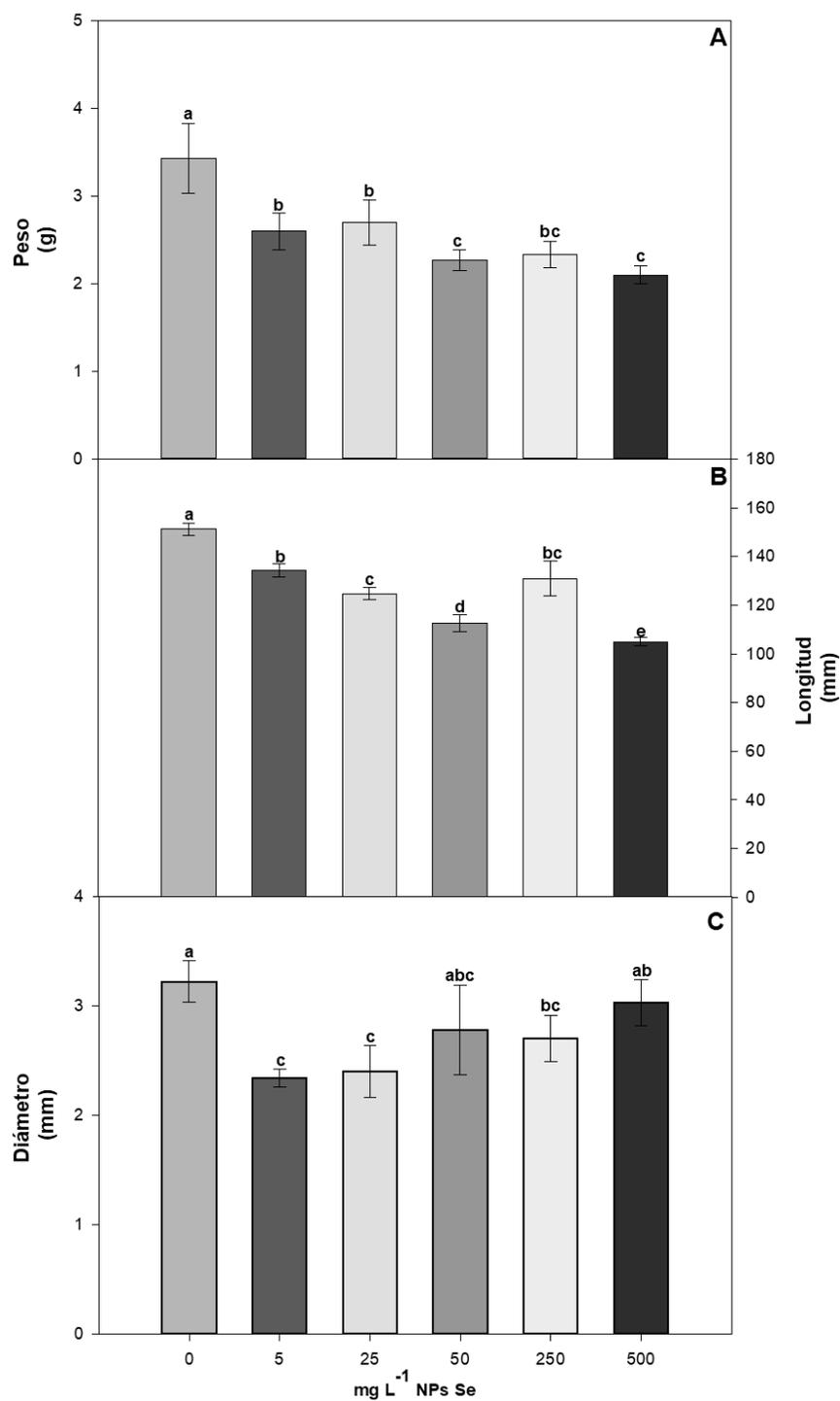


Figura 4. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en los parámetros de peso (A), diámetro (B) y longitud (C). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$).

11.1.2. Variación en el color

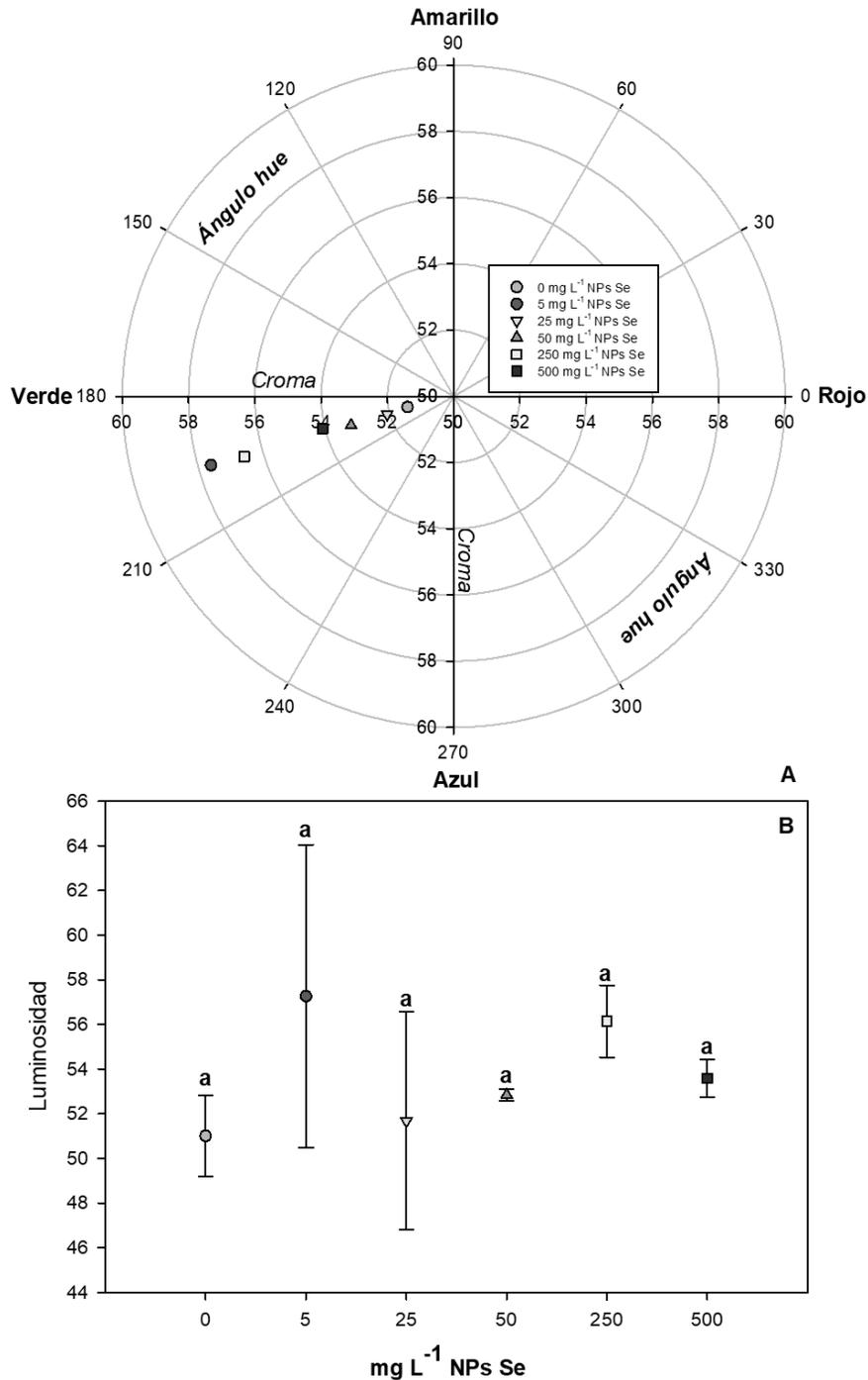


Figura 5. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en los parámetros de peso (A), diámetro (B) y longitud (C). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$).

En la Figura 5, se observó el color para los parámetros de croma y ángulo hue (A) en los cuales se apreció que no existen diferencias estadísticamente significativas, podemos identificar que los rangos de color que se muestran se encuentran entre un promedio del ángulo hue de 115.25° siendo este el mayor y un promedio de 110.99° siendo este el menor; estos datos, que corresponden a los tratamientos de 0 mg L^{-1} NPs Se y 250 mg L^{-1} NPs Se respectivamente localizados dentro de los colores verdes. Para el parámetro de luminosidad (B) un promedio entre los 50% y 58% en los tratamientos sin diferencias estadísticamente significativas fueron observados.

11.1.3. Variación de pH, acidez titulable, grados °Brix

En el Cuadro 2 observamos el efecto de la aplicación foliar de las NPs Se a diferentes concentraciones; con respecto a sólidos solubles totales la mayor concentración se presentó en el tratamiento de 5 mg L^{-1} NPs Se, sin tener una diferencia estadísticamente significativa con respecto a 250 mg L^{-1} NPs Se, la cual no presentan diferencias con el resto de los tratamientos. Estos valores son similares a lo reportado por (Santiago-Saenz et al., 2018) donde en verdolaga presentan un valor de 4.73 en este parámetro.

Con respecto al pH no demostró diferencias significativas entre las verdolagas tratadas con aplicación foliar de NPs Se y las sin aplicación. En relación con el promedio de pH 4.29 reportado en verdolaga (Santiago-Saenz et al., 2018). Se observaron diferencias en acidez titulable, los tratamientos 0, 25 y 50 mg L^{-1} NPs Se son los que muestran similitudes mostrando diferencias estadísticamente significativas con los tratamientos 5, 500 y 250 siendo este el de menor contenido en porcentaje de ácido cítrico.

Con este parámetro se determinó el índice de sabor (*Ecuación 2*) con los cual podemos identificar que la aplicación de NPs Se mejora el parámetro en la mayoría del caso estando

arriba del valor de 1. De acuerdo a Hernández-Suárez et al., (2008), a valores por arriba de 1 el sabor es mayormente aceptable para consumo, esto nos indica que las verdolagas con NPs Se tendría una mejor aceptación por los consumidores de este tipo de alimento.

Cuadro 2. Efecto de las NPs Se sobre sólidos solubles totales (°Brix) , pH, acidez titulable e índice de sabor (% ácido cítrico) en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.)

| Tratamientos | SST (°Brix) | pH | AT (% ácido cítrico) | Índice de sabor |
|-------------------------------|----------------|--------------|-------------------------|--------------------|
| 0 mg L ⁻¹ NPs Se | 4.37 ± 0.40b | 4.25 ± 0.08a | 0.39 ± 0.01a | 0.947 ± 0.047d |
| 05 mg L ⁻¹ NPs Se | 5.70 ± 0.17a | 4.37 ± 0.07a | 0.27 ± 0.02b | 1.336 ± 0.063a |
| 25 mg L ⁻¹ NPs Se | 4.40 ± 0.26b | 4.29 ± 0.06a | 0.42 ± 0.02a | 0.945 ± 0.036d |
| 50 mg L ⁻¹ NPs Se | 5.03 ± 0.35ab | 4.31 ± 0.01a | 0.38 ± 0.02a | 1.042 ± 0.043c |
| 250 mg L ⁻¹ NPs Se | 4.40 ± 0.26b | 4.46 ± 0.17a | 0.23 ± 0.02b | 1.197 ± 0.023b |
| 500 mg L ⁻¹ NPs Se | 4.83 ± 0.42ab | 4.35 ± 0.04a | 0.27 ± 0.05b | 1.178 ± 0.035b |

Medias en cada columna con diferentes letras son diferentes estadísticamente de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P≤0.05).

11.2. Comportamiento de compuestos bioactivos verdolaga por efecto de la aplicación de NPs Se a diferentes concentraciones

11.2.1. Concentración de ácido ascórbico

En el contenido de ácido ascórbico se encontraron diferencias, siendo los tratamientos de 250 y 500 mg L⁻¹ NPs Se con 3.61 y 3.48 mg g⁻¹ PS (peso seco) respectivamente en los cuales el aumento de este compuesto fue más notable en comparación con el tratamiento 0 mg L⁻¹ NPs Se (control) de 2.41 mg g⁻¹ PS y con diferencias al igual en los tratamientos de 5, 25 y 50 mg L⁻¹ NPs Se.

Por lo cual, se puede observar que la aplicación de nanopartículas de selenio benefició el aumento de este compuesto. Rezaei-Nazari et al., (2022) reportaron que el contenido de compuestos antioxidantes no enzimáticos como el ácido ascórbico incrementó en la aplicación de NPs de Se en plantas de *Hypericum perforatum*.

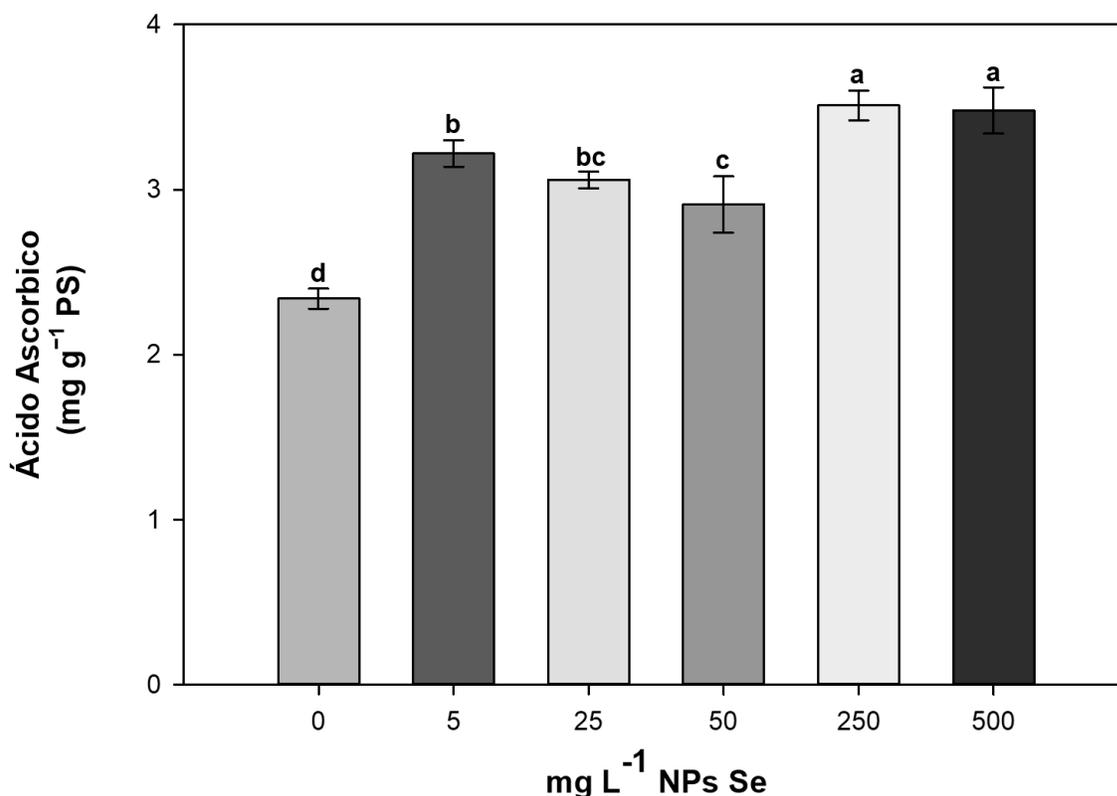


Figura 6. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en la concentración de ácido ascórbico. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$).

Hondal (2023) en su análisis de vitaminología del selenio menciona que el selenio está relacionado con el ascorbato, dado que estimula la generación de la enzima tiorredoxina reductasa la cual tiene la capacidad de reducir tanto el radical libre arcorbilo como el ácido deshidroascórbico a ascorbato, de esta manera relacionando que entre mayor concentración

de selenio disponible en las rutas metabólicas mayor contenido de esta enzima y por ende la concentración de ácido ascórbico aumenta.

11.2.2. Concentración de carotenoides

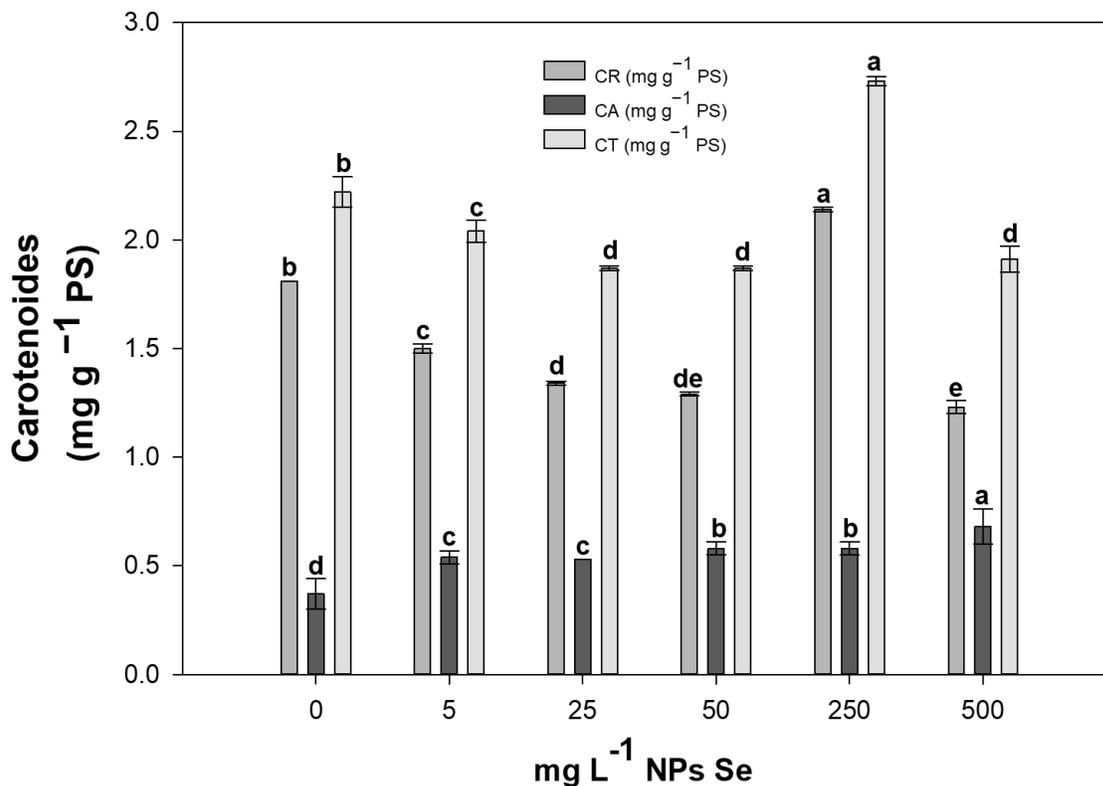


Figura 7. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en la concentración de carotenoides amarillos (CA), carotenoides rojos (CR) y carotenoides totales (CT). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$).

Referente al comportamiento de los carotenoides rojos (CR), carotenoides amarillos (CA) y carotenoides totales (CT) (Figura 7), se observó que después de la aplicación de 250 mg L⁻¹ NPs Se, se presenta mayor contenido de carotenoides tanto rojos (2.14 mg g⁻¹ PS) y carotenoides totales (2.73 mg g⁻¹ PS). Así mismo, para carotenoides amarillos el tratamiento

con 500 mg L⁻¹ NPs Se (0.68 mg g⁻¹ PS), siendo el tratamiento de 0 mg L⁻¹ NPs Se (0.37 mg g⁻¹ PS) el de menor contenido de este compuesto. Nemzer et al., (2020), mencionan que al comparar verdolaga silvestre con cultivada encontraron algunas diferencias en cuanto al contenido de carotenoides, vitamina E y vitamina C, esto se debe al estrés que presentan por los factores externos en condiciones silvestres (Lim & Quah, 2007).

11.2.3. Concentración de clorofila

En cuanto al contenido de clorofila se presenta en la Figura 8, en la cual se puede observar que el tratamiento con 250 mg L⁻¹ NPs Se reporta el mayor contenido de clorofila a (24.30 mg g⁻¹ PS), b (9.22 mg g⁻¹ PS) y total (33.53 mg g⁻¹ PS). La literatura comenta que la aplicación de nanopartículas beneficia la concentración de pigmentos fotosintéticos en hortalizas (Gudkov et al., 2020), en el caso de la verdolaga se aumenta, ya que aquellas donde si se aplicaron NPs Se presentaron el menor contenido en este compuesto para clorofila a (14.4 mg g⁻¹ PS), b (5.08 mg g⁻¹ PS) y total (19.52 mg g⁻¹ PS). Estos valores menores a los reportados por Santiago-Saenz et al., (2018) donde obtuvieron concentraciones de clorofila a y clorofila b de 23.22 mg g⁻¹ PS y 23.22 mg g⁻¹ PS respectivamente con un total de clorofilas 66.22 mg g⁻¹ PS, esto debido a que las verdolagas analizadas tuvieron diferentes condiciones a la presentadas en esta investigación.

Por otro lado, en otro estudio donde se sometio *Lycium chinense* L. a diferentes concentraciones de selenio en forma de selenito de sodio, aumentó considerablemente el contenido de carotenoides, clorofila a y clorofila b (Dong et al., 2013).

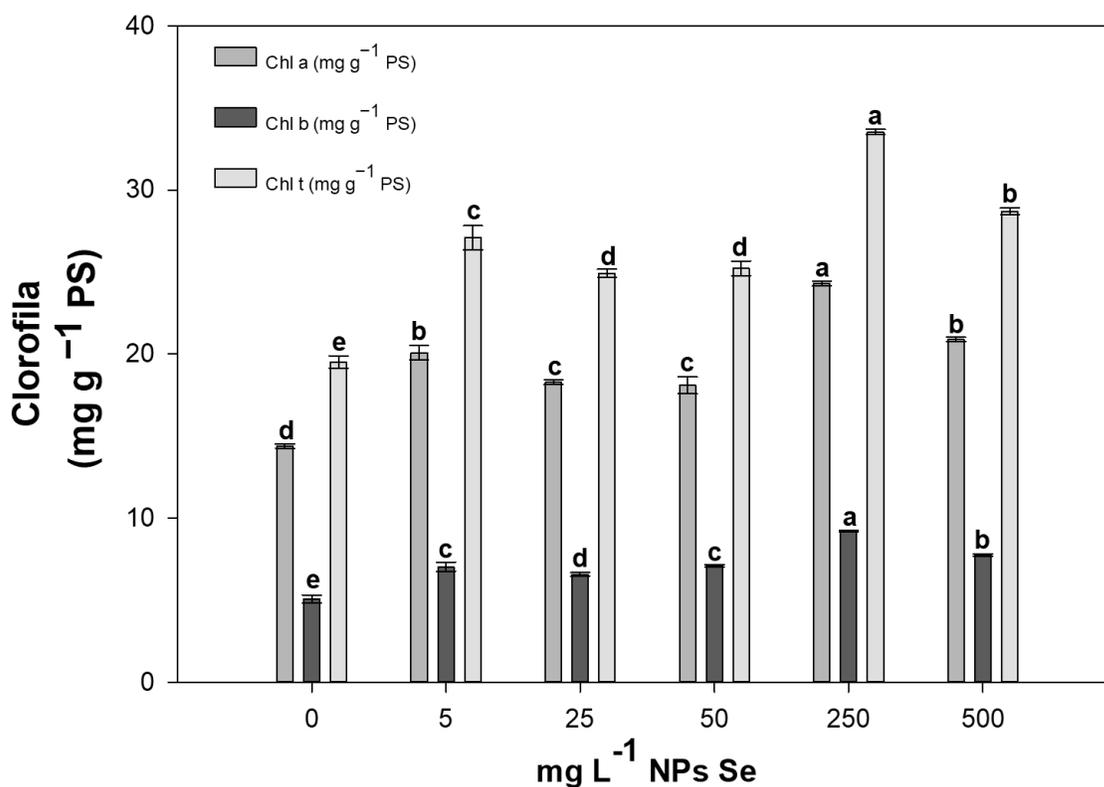


Figura 8. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en la concentración de clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) y clorofila total (Chl t). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$).

11.2.4. Concentración de fenoles y flavonoides

Referente al contenido de fenoles totales (Figura 9, A) en verdolagas después de la aplicación foliar a diferentes concentraciones de selenio observamos que la aplicación con 5 mg L⁻¹ NPs Se (7.36 mg GAE g⁻¹ PS), presentó diferencias significativas con las verdolagas sin aplicación de NPs Se (6.41 mg GAE g⁻¹ PS), sin embargo, no se presentaron diferencias con las demás aplicaciones de NPs Se. Kiumarzi et al., (2022) reportó en plantas de verdolaga con la aplicación de un complejo de NPs de Fe [Fe(ALA)₃] a diferentes concentraciones el incremento en el contenido de fenoles totales. Pero este cambio se pudo ver reducido por el efecto que tiene el selenio sobre este tipo de compuestos, en hojas *Vitis vinifera* L. cv. Sultana

con estrés salino y aplicación de selenio (Se) se pudo observar que a una concentración de 5 mg L⁻¹, mejora los contenidos de estos compuestos, pero a mayor concentración disminuye la presencia de fenoles (Karimi et al., 2020).

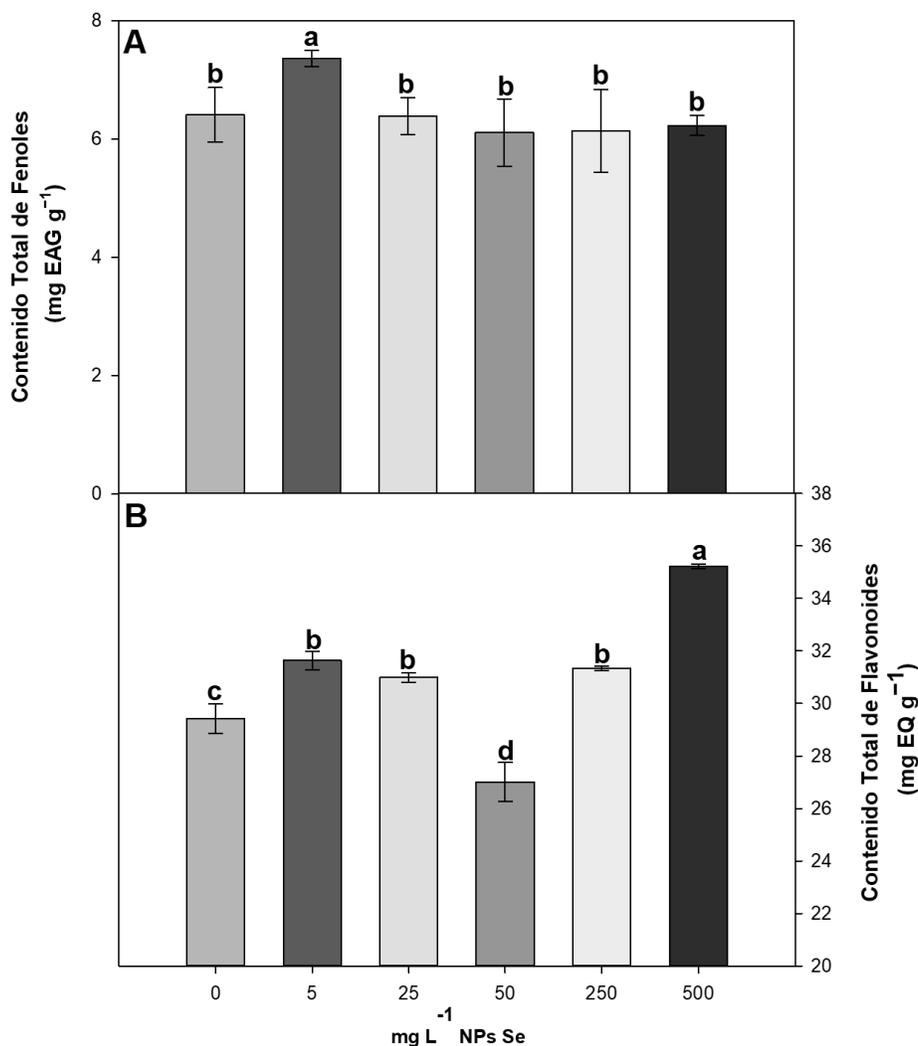


Figura 9. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en el contenido de fenoles (A) y flavonoides (B). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), (P ≤ 0.05).

Por otro lado, con respecto a los flavonoides, se observaron diferencias significativas en el contenido (Figura 7, B) en plantas de verdolaga tratadas con NPs Se. Como se observa, el tratamiento con 500 mg L⁻¹ (35.21 mg EQ g⁻¹ PS) reportó un 19.68% más alto en comparación

al sin aplicación de NPs Se, lo cual indica que la aplicación foliar de nanopartículas de selenio favorece el incremento de este compuesto. Ghorbanpour et al., (2014) observó un incremento en el contenido de flavonoides en plantas de salvia (*Salvia officinalis*) con la aplicación de NPs de nano-TiO₂.

11.2.5. Concentración de antocianinas.

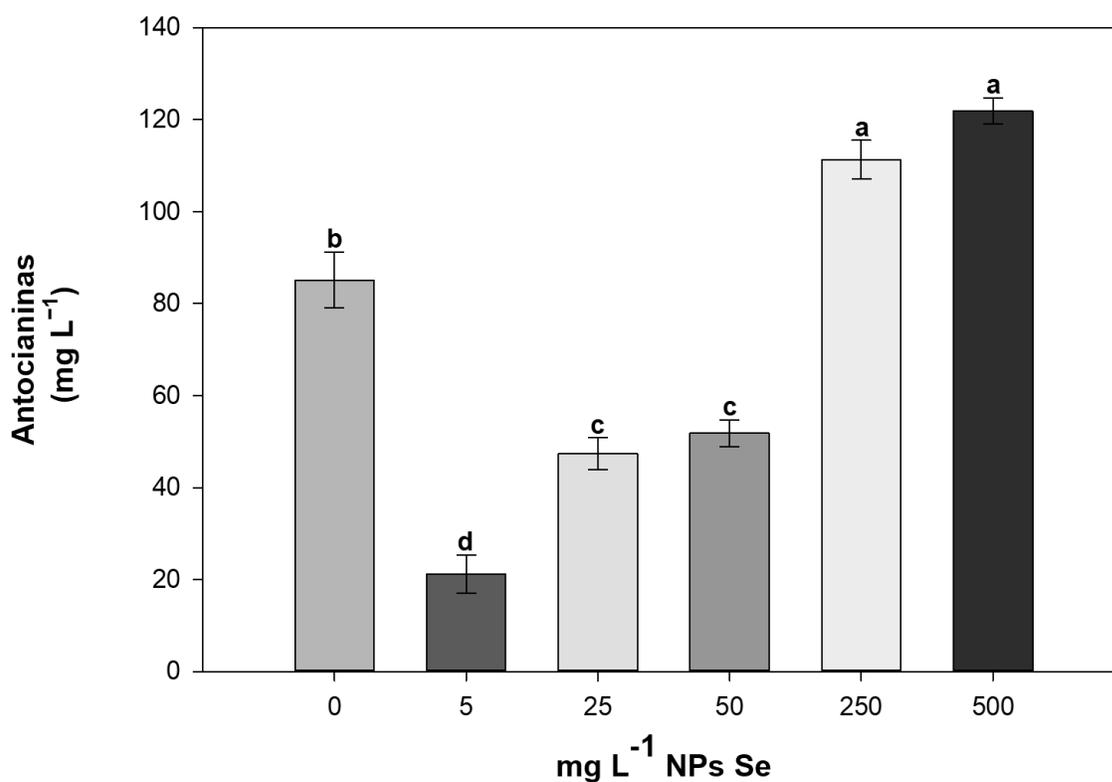


Figura 10. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en la concentración de antocianinas. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$).

Conforme a la concentración de antocianinas podemos observar para las primeras tres aplicaciones de NPs Se (5, 25, 50 mg L⁻¹), las verdolagas presentaron una reducción en este compuesto que se puede deber a que en esta concentración las interacciones con las rutas metabólicas no favorecen la generación de antocianinas afectando su formación, sin

embargo, al aumentar su concentración a 250 y 500 mg L⁻¹ NPs Se observamos mayor contenido de 111.33 y 121.90 mg L⁻¹ respectivamente que el sin aplicación de nanopartículas (0 mg L⁻¹ NPs Se) 85.16 mg L⁻¹. Esta concentración es parecido reportado por Silva & Carvalho, (2014), donde analizaron hojas, tallos y flores de verdolaga donde obtuvieron valores de 86.00, 88.8 y 95.5 mg L⁻¹ respetivamente .

11.3. Actividad antioxidante no enzimática en verdolaga por efecto de la concentración de nanopartículas de selenio

11.3.1. Variación de la actividad antioxidante mediante la capacidad de inhibición del radical DPPH•

En la Figura 11 (B) se muestra que la mayor inhibición del radical DPPH, se presentó en las verdolagas tratadas con 5 mg L⁻¹ NPs Se (24.26 μM Trolox g⁻¹ PS) sin diferencia estadísticamente significativa en comparación con el tratamiento de 250 mg L⁻¹ NPs Se (24.18 μM Trolox g⁻¹ PS). Los tratamientos sin aplicación de NPs Se y 500 mg L⁻¹ NPs Se presentaron menor capacidad en inhibición de este radical, presentando valores similares a los reportados por Santiago-Saenz et al., (2018) en verdolaga silvestre.

El comportamiento del radical DPPH puede deberse a que como solo interactúa con compuestos no polares no hay una mayor inhibición comparada con el ABTS. Dentro del contenido nutrimental de la verdolaga podemos encontrar algunos terpenos y alcaloides con actividad antioxidante que pueden ser los que tiene interacción con el radical que permiten este comportamiento (Kumar et al., 2022).

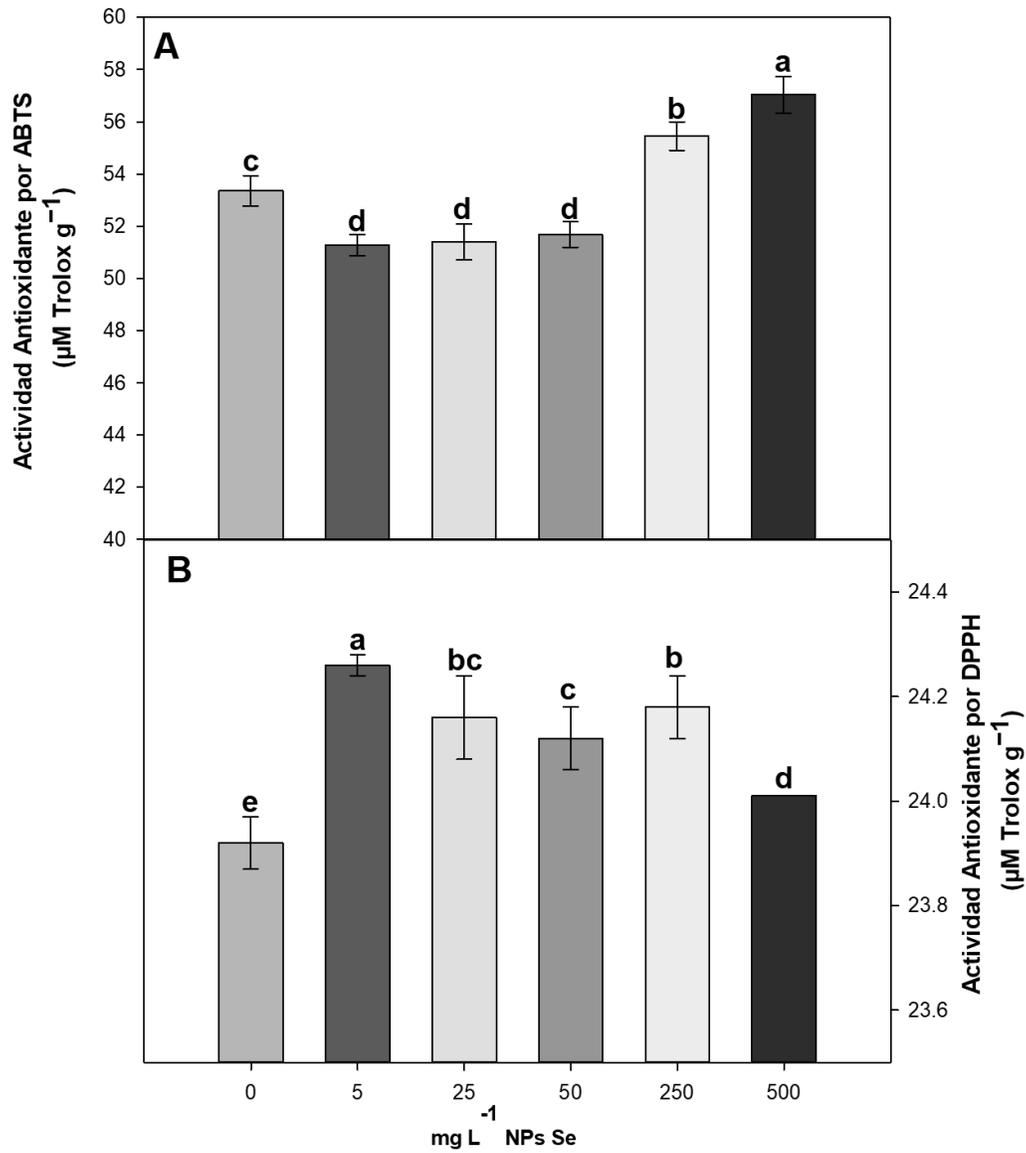


Figura 11. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) para la actividad antioxidante por el radical ABTS^{•+} (A) y DPPH[•] (B). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$).

11.3.2. Variación de la actividad antioxidante mediante la capacidad de inhibición del radical ABTS^{•+}

Para la actividad antioxidante por el radical ABTS (Figura 11, A) el tratamiento con 500 mg L⁻¹ NPs Se presento una capacidad de 57.03 μM equivalente de Trolox por gramos de peso seco, siendo esta la más alta y la que mayor capacidad de inhibir el radical presentó. Estos datos son mayores a los obtenidos por Montoya-García et al., (2017) donde se evaluó la capacidad antioxidante de verdolaga con fertilización de NPK (nitrógeno-fosforo-potasio) a diferente concentración en cielo abierto.

Por otro lado, esta actividad se puede deber a la relación que tiene con el comportamiento que presentan los flavonoides (Figura 9, A) y las antocianinas (Figura 10), dado que este radical tiene interacciones tanto con compuestos polares como no polares. También, el grupo de los flavonoides es uno de los metabolitos secundarios con propiedades hidrofílicas de mayor actividad antioxidantes que encontramos de manera natural en las plantas (Zhang et al., 2022).

11.4. Actividad enzimática y marcadores de daño en verdolaga por efecto de la concentración de nanopartículas de selenio

11.4.1. Actividad enzimática en verdolaga

Las especies reactivas de oxígeno (ROS) son los principales causantes de daño en la estructura celular; dentro de las principales fuentes se encuentran los cloroplastos, peroxisomas y las mitocondrias las cuales producen el radical superóxido (O₂^{•-}) y peróxido de hidrogeno (H₂O₂) como subproductos del metabolismo. Sin embargo, las ROS también cumplen un papel importante dentro de las plantas como señalizadores para el desarrollo, los

diferenciadores de niveles redox, las señalizaciones de estrés, la interacción con otros organismos, las respuestas sistemáticas y la muerte celular (Mittler, 2017).

La enzima superóxido se encarga de degradar el radical O_2^{\bullet} precursor de la mayoría de los ROS, de esta manera inhibiendo el daño celular que puede ocasionar al intentar estabilizarse. Esta enzima cuenta con múltiples cofactores metálicos tales como cobre (Cu), zinc (Zn), magnesio (Mn) y hierro (Fe) que estimulan la actividad de la SOD para empezar con la degradación de superóxido a H_2O_2 (Chen et al., 2023).

En esta investigación, las verdolagas con mayor actividad SOD (Figura 12, B) fueron aquellas que se sometieron a una aplicación con 25 mg L^{-1} NPs. Como podemos observar el comportamiento de esta enzima no es parecido con las demás enzimas de acuerdo a la concentración de NPs. Se esto se puede deber a que como el selenio no se comporta como un cofactor de SOD. Sin embargo, encontramos cambios entre los diferentes tratamientos dado que se generan mayor cantidad de aminoácidos esenciales como la cisteína y metionina con la presencia de selenio, ya que este suplanta al azufre en la producción de estos en las plantas (Wu et al., 2023).

De este modo, en el proceso de degradación de los radicales un objetivo principal es el H_2O_2 ya que si este compuesto llega a reaccionar con presencia de iones de hierro (reacción de Fenton) o radical superóxido (reacción de Haber-Weiss) generan el radical hidroxilo (OH^{\bullet}) considerado uno de los oxidantes más fuertes que podemos encontrar en la naturaleza (Mittler, 2017). Por lo cual, las peroxidases dentro de las cuales encontramos la catalasa (CAT), peroxidasa (POD), ascorbato peroxidasa (APx) y glutatión peroxidasa (GPX) se encargan de degradar el peróxido de hidrógeno a oxígeno y agua.

La catalasa es una enzima antioxidante que se encuentra en los organismos aerobios ubicada en los peroxisomas, siendo esta la que presenta mejor actividad en la catálisis del peróxido de hidrogeno(de Araujo et al., 2023), degradando aproximadamente 6 millones de moléculas de H₂O₂ en agua y oxígeno por minuto por cada molécula de catalasa (Rahman, 2007).

Para la actividad antioxidantes por la enzima catalasa (Figura 12, A) observamos un comportamiento ascendente que se presenta a mayor concentración de NPs Se, observándose una mejora en la actividad de esta, siendo el tratamiento con 500 mg L⁻¹ NPs (7.58 U mg⁻¹) con mayor actividad y 0 mg L⁻¹ NPs (1.95 U mg⁻¹) el de menor. Este comportamiento similar se presentó en verdolagas aplicadas con nanopartículas de zinc al sustrato donde se observan resultados directamente proporcionales (NPs-Actividad CAT) (Iziy et al., 2019).

Así mismo, el comportamiento la ascorbato peroxidasa (APx) (Figura 12, C) fue similar al comportamiento de la CAT referente a la concentración de NPs Se, mejorando la actividad enzimática de APx. De acuerdo, con de Araujo et al., (2023) donde aplicaron selenio a caña de azúcar donde observaron que tanto la enzima de SOD como APx mostraron un aumento con la aplicación de 10 μmol L⁻¹ de selenio. Sin embargo, en esta investigación se presentó que las verdolagas cuentan con alta tolerancia al selenio, donde con 500 mg L⁻¹ NPs Se se observó la mayor actividad APx (143.92 U mg⁻¹), comprado con el tratamiento testigo (40.06 U mg⁻¹) teniendo casi 3 veces más actividad.

También podemos relacionar la APx con la concentración del ácido ascórbico (Figura 6) donde se observa el mismo comportamiento en el aumento del compuesto y la enzima, lo cual se explica a que el ascorbato funciona como sustrato (Sharma & Ahmad, 2014).

En cuanto a la concentración de la enzima peroxidasa (POD), fue significativamente mayor para la aplicación con 250 mg L⁻¹ NPs (1015.76 U mg⁻¹) mejorando la actividad enzimática 137 % mayor (Figura 12, D) en comparación con el control (0 mg L⁻¹ NPs Se) 426.90 U mg⁻¹.¹ Esto puede deberse a que el selenio interviene en algunas rutas metabólicas donde se genera mayor cantidad de flavonoides y fenoles. El comportamiento es similar a lo reportado por (Shi et al., 2023), donde al aplicar nanoselenio se aumentó la actividad de POD al aplicar de 10 mg L⁻¹, siendo este mayor por 29.64% al control.

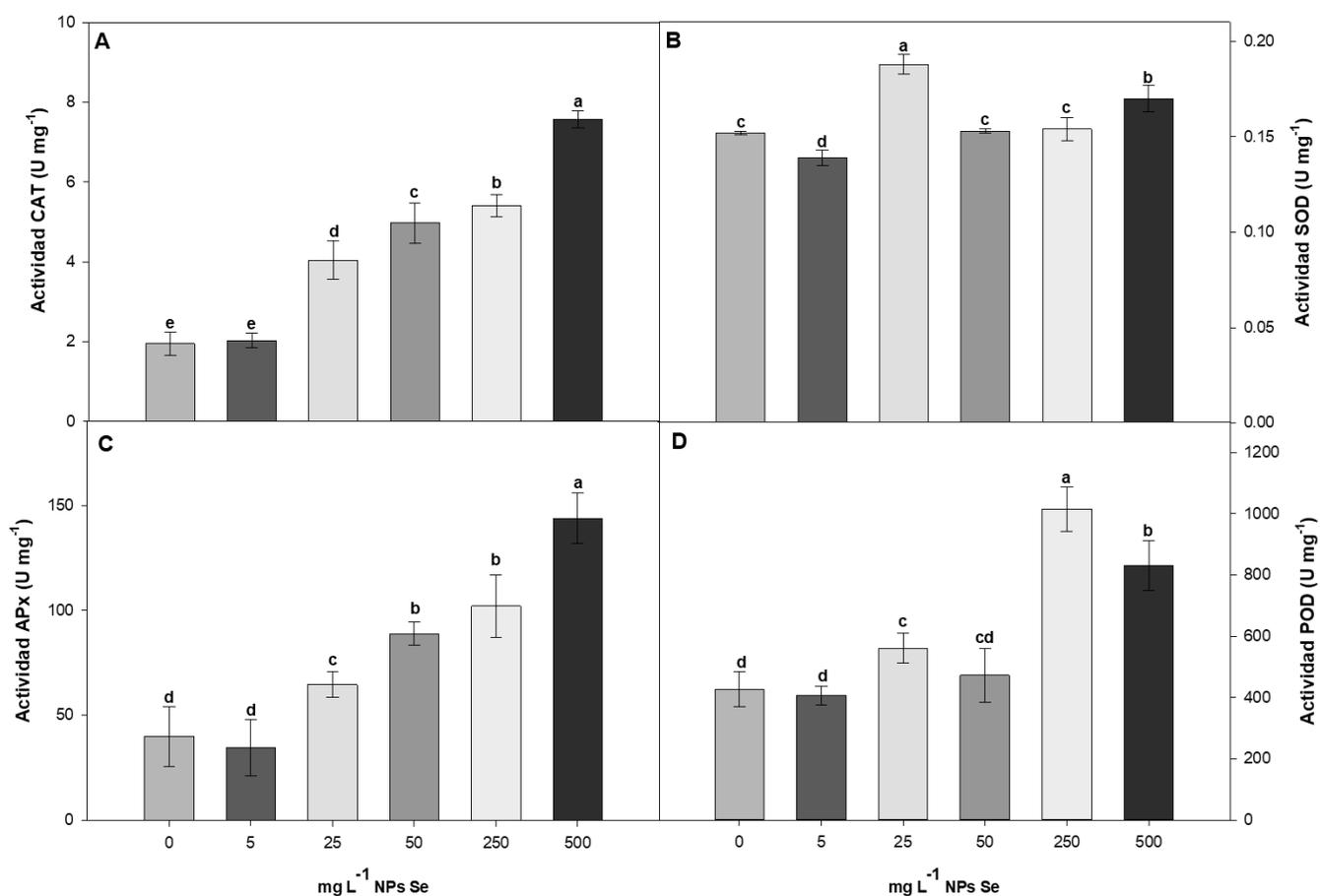


Figura 12. Efecto de las NPs Se a diferentes concentraciones en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) en la actividad enzimática de catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (APx) y peroxidasa (POD). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), ($P \leq 0.05$).

11.4.2. Marcadores de daño en verdolaga

Dentro de los marcadores de estrés en plantas podemos encontrar el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) que, al ser un producto de la degradación de los ROS, también permite identificar si la actividad enzimática SOD está presente durante el proceso de eliminación del radical súper óxido, de esta manera promoviendo la actividad de las enzimas peroxidasas antes mencionadas (CAT, SOD, APx y POD) que se encargan de degradar este compuesto en agua y oxígeno. Podemos observar que el H_2O_2 tiene el menor valor en el tratamiento control (0 mg L^{-1} NPs Se), esto puede deberse a que, al aplicar las nanopartículas se vieron modificadas las rutas metabólicas en la verdolaga lo cual ocasiono que se generara mayor contenido de peróxido de hidrógeno, teniendo valores superiores a 10 veces la concentración presentada en el Cuadro 3.

También se determinó la peroxidación lipídica, una evaluación que permite cuantificar el daño que sufre la pared de la célula y la cual se expresa como el contenido de malondialdehído (MDA), compuesto que, es generado por la interacción del radical hidroxilo (OH^\bullet) que al reaccionar con las estructuras de la pared celular secuestra electrones a esta lo cual la desestabiliza, promoviendo la generación de MDA y la actividad de la enzima polifenol oxidasa (Sharma et al., 2017).

En las verdolagas tratadas con NPs Se podemos observar que las aplicaciones ($5, 25, 50$ y 250 mg L^{-1}) presentaron menor concentración de MDA (Cuadro 3) que el tratamiento control (0 mg L^{-1}) con excepción de la aplicación a 500 mg L^{-1} NPs Se, donde obtuvimos el valor más alto, observado en la Figura 2;3 donde notamos los daños que sufrió la verdolaga de manera física a esta concentración.

Este comportamiento se replicó para la enzima polifenol oxidasa (PPO), esta enzima es la principal responsable de las reacciones de pardeamiento. La concentración de fenoles está relacionada con la actividad de PPO, dependiendo del tipo de fenoles tenga la planta (Derardja et al., 2022). De acuerdo El-Badri et al., (2021) estos compuestos son el principal sustrato y a medida que se consumen en la reacción son lo más afectados durante el proceso de pardeamiento enzimático.

Cuadro 3. Efecto de las NPs Se sobre marcadores de daño en verdolaga (*Portulaca oleracea* L.)

| Tratamientos | Polifenol oxidasa (PPO) | Peróxido de Hidrogeno (H₂O₂) | Peroxidación lipídica (MDA) |
|-------------------------------|--------------------------------|---|------------------------------------|
| 0 mg L ⁻¹ NPs Se | 0.070 ± 0.004b | 7.615 ± 3.053d | 8.974 ± 0.339a |
| 05 mg L ⁻¹ NPs Se | 0.054 ± 0.006c | 66.846 ± 1.763c | 5.812 ± 0.392dc |
| 25 mg L ⁻¹ NPs Se | 0.028 ± 0.005e | 82.231 ± 1.763b | 6.538 ± 0.128bc |
| 50 mg L ⁻¹ NPs Se | 0.038 ± 0.008de | 109.923 ± 5.453a | 5.214 ± 0.658cd |
| 250 mg L ⁻¹ NPs Se | 0.040 ± 0.002d | 87.231 ± 3.053b | 7.179 ± 0.444d |
| 500 mg L ⁻¹ NPs Se | 0.086 ± 0.007a | 108.769 ± 4.663a | 9.316 ± 0.854a |

Medias en cada columna con diferentes letras son diferentes estadísticamente de acuerdo a la prueba de Fisher (LSD), P≤0.05).

12. CONCLUSIONES

Se observó que la aplicación foliar de nanopartículas de selenio a diferentes concentraciones, mejoran la calidad fisicoquímica e intrínseca en el cultivo de verdolaga. La aplicación foliar de nanopartículas de selenio a una concentración de 250 mg L^{-1} demostró ser el tratamiento más viable para actuar como un estimulante en el sistema antioxidante enzimático mejorando la actividad de la SOD, CAT, APx y POD, así como la concentración de compuestos bioactivos como el ácido ascórbico, carotenoides, clorofilas, antocianinas. La aplicación foliar de 500 mg L^{-1} NPs Se, indujo en el producto daños visibles, viéndose afectada la integridad de la pared celular debido a una mayor concentración de malondialdehído, lo cual se corroboró mediante los resultados de peroxidación lipídica y la determinación de la enzima polifenol oxidasa donde se observaron los valores más altos en este tratamiento, afectando de esta manera sustancialmente el rendimiento del producto final.

Por otro lado, este estudio proporciona una valiosa visión, sobre el uso de las nanopartículas de selenio en hortalizas, para aumentar la productividad de metabolitos secundarios con propiedades antioxidantes y enzimas antioxidantes

13. REFERENCIAS

- Agha-Hosseini, F., Borhan-Mojabi, K., Monsef-Esfahani, H.-R., Mirzaii-Dizgah, I., Etemad-Moghadam, S., & Karagah, A. (2010). Efficacy of purslane in the treatment of oral lichen planus. *Phytotherapy Research*, 24(2), 240–244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ptr.2919>
- Al-Otibi, F., Alfuzan, S. A., Alharbi, R. I., Al-Askar, A. A., AL-Otaibi, R. M., Al Subaie, H. F., & Moubayed, N. M. S. (2022). Comparative study of antifungal activity of two preparations of green silver nanoparticles from *Portulaca oleracea* extract. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4), 2772–2781. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.056>
- Al-Quraishy, S., Dkhil, M. A., & Abdel Moneim, A. E. (2012). Protective effects of *Portulaca oleracea* against rotenone mediated depletion of glutathione in the striatum of rats as an animal model of Parkinson’s disease. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 103(2), 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2012.04.005>
- Association of Official Analytical Chemists International (AOAC). (2005). *Official Methods of Analysis* (18th edn). Association of Official Analytical Chemists International, Gaithersburg.
- Azeez, L., Oladejo, A. A., Adejumo, A. L., Kolawole, T. O., Aremu, H. K., Busari, H. K., & Abdulrasaq, O. O. (2023). A synergistic combination of selenium nanoparticles, goldmine soil and water disrupt phytomorphological and biochemical parameters of *Abelmoscus esculentus*. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100304. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100304>
- Balois-Morales, R., Colinas-León, ; M T, Peña-Valdivia, ; C B, Chávez-Franco, ; S H, & Alia-Tejagal, ; I. (2007). Sistema enzimático antisenescencia, catalasa-superóxido dismutasa, de frutos de pitahaya (*Hylocereus undatus*) almacenados con frío. En *Revista Chapingo Serie Horticultura* (Vol. 14, Número 3).
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). *Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity*. 28, 25–30.
- Cai, Y., Luo, Q., Sun, M., & Corke, H. (2004). Antioxidant activity and phenolic compounds of 112 traditional Chinese medicinal plants associated with anticancer. *Life Sciences*, 74(17), 2157–2184. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2003.09.047>
- Castelli, M. V., & López, S. N. (2017). Homoisoflavonoids: Occurrence, biosynthesis, and biological activity. En *Studies in Natural Products Chemistry* (Vol. 54, pp. 315–354). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63929-5.00009-7>
- Chandrasekara, A. (2018). *Phenolic Acids*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814026-0.22395-0>

- Chen, D., Ai, X., Li, Y., Li, Y., Ao, Y., Rong, J., & Li, G. (2023). Protective effects of Cu/Zn-SOD and Mn-SOD on UVC radiation-induced damage in NIH/3T3 cells and murine skin. *Acta Histochemica*, 125(4), 152030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.acthis.2023.152030>
- de Araujo, M. A., de Melo, A. A. R., Silva, V. M., & dos Reis, A. R. (2023). Selenium enhances ROS scavenging systems and sugar metabolism increasing growth of sugarcane plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 201, 107798. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107798>
- de Oliveira, V. C., Faquin, V., Andrade, F. R., Carneiro, J. P., da Silva Júnior, E. C., de Souza, K. R. D., Pereira, J., & Guilherme, L. R. G. (2019). Physiological and physicochemical responses of potato to selenium biofortification in tropical soil. *Potato Research*, 62(3), 315–331. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-9413-8>
- Dong, J. Z., Wang, Y., Wang, S. H., Yin, L. P., Xu, G. J., Zheng, C., Lei, C., & Zhang, M. Z. (2013). Selenium increases chlorogenic acid, chlorophyll and carotenoids of *Lycium chinense* leaves. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(2), 310–315. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.5758>
- Duan, L., Tao, H. W., Hao, X. J., Gu, Q. Q., & Zhu, W. M. (2009). Cytotoxic and antioxidative phenolic compounds from the traditional chinese medicinal plant, myristica fragrans. *Planta Medica*, 75(11), 1241–1245. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1185506>
- Dwivedi, S., Mishra, A., Kumar, A., Tripathi, P., Dave, R., Dixit, G., Tiwari, K. K., Srivastava, S., Shukla, M. K., & Tripathi, R. D. (2012). Bioremediation potential of genus *Portulaca* L. collected from industrial areas in Vadodara, Gujarat, India. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(2), 223–228. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0389-6>
- eddine Derardja, A., Pretzler, M., Kampatsikas, I., Radovic, M., Fabisikova, A., Zehl, M., Barkat, M., & Rompel, A. (2022). Polyphenol oxidase and enzymatic browning in apricot (*Prunus armeniaca* L.): Effect on phenolic composition and deduction of main substrates. *Current Research in Food Science*, 5, 196–206. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crf.2021.12.015>
- El-Badri, A. M., Batool, M., Wang, C., Hashem, A. M., Tabl, K. M., Nishawy, E., Kuai, J., Zhou, G., & Wang, B. (2021). Selenium and zinc oxide nanoparticles modulate the molecular and morpho-physiological processes during seed germination of *Brassica napus* under salt stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112695>
- El-Desouky, T. A. (2021). Evaluation of effectiveness aqueous extract for some leaves of wild edible plants in Egypt as anti-fungal and anti-toxicogenic. *Heliyon*, 7(2), e06209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06209>

- Elkhayat, E. S., Ibrahim, S. R. M., & Aziz, M. A. (2008). Portulene, a new diterpene from *Portulaca oleracea* L. *Journal of Asian Natural Products Research*, 10(11), 1039–1043. <https://doi.org/10.1080/10286020802320590>
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Najjar, A. A., Alzahrani, S. O., Alkhatib, F. M., Shafi, M. E., Selem, E., Desoky, E.-S. M., Fouda, S. E. E., El-Tahan, A. M., & Hassan, M. A. A. (2021). The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4461–4471. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.043>
- Erkan, N. (2012). Antioxidant activity and phenolic compounds of fractions from *Portulaca oleracea* L. *Food Chemistry*, 133(3), 775–781. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.01.091>
- Farooq, M. A., Islam, F., Ayyaz, A., Chen, W., Noor, Y., Hu, W., Hannan, F., & Zhou, W. (2022). Mitigation effects of exogenous melatonin-selenium nanoparticles on arsenic-induced stress in *Brassica napus*. *Environmental Pollution*, 292, 118473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118473>
- Feung, C.-S., Hamilton, R. H., & Witham, F. H. (1971). Metabolism of 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid by soybean cotyledon callus tissue cultures. En *J. AGR. FOOD CHEM* (Vol. 19, Número 3).
- Firdhouse, J., Firdhouse, M. J., & Lalitha, P. (2012). *Green synthesis of silver nanoparticles using the aqueous extract of Portulaca oleracea (L.)*.
- Fish, W. W., Perkins-Veazie, P., & Collins, J. K. (2002). A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15(3), 309–317. <https://doi.org/10.1006/jfca.2002.1069>
- Ghorbanpour, M., Hosseini, N., Khodae-Motlagh, M., & Solgi, M. (2014). The effects of inoculation with pseudomonads rhizobacteria on growth, quantity and quality of essential oils in sage (*Salvia officinalis* L.) Plant. *Journal of Medicinal Plants*, 13(52). <http://jmp.ir/article-1-875-en.html>
- Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2001). *Characterization and measurement of anthocyanins by UV-Visible spectroscopy*.
- Gudkov, S. V., Shafeev, G. A., Glinushkin, A. P., Shkirin, A. V., Barmina, E. V., Rakov, I. I., Simakin, A. V., Kislov, A. V., Astashev, M. E., Vodeneev, V. A., & Kalinitchenko, V. P. (2020). Production and Use of Selenium Nanoparticles as Fertilizers. *ACS Omega*, 5(28), 17767–17774. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02448>
- He, Y., Long, H., Zou, C., Yang, W., Jiang, L., Xiao, Z., Li, Q., & Long, S. (2021). Anti-nociceptive effect of *Portulaca oleracea* L. ethanol extracts attenuated zymosan-induced mouse joint inflammation via inhibition of Nrf2 expression. *Innate Immunity*, 27(3), 230–239. <https://doi.org/10.1177/1753425921994190>

- Hernández-Suárez, M., Rodríguez-Rodríguez, E. M., & Díaz-Romero, C. (2008). Chemical composition of tomato (*Lycopersicon esculentum*) from Tenerife, the Canary Islands. *Food Chemistry*, *106*(3), 1046–1056. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.025>
- Hondal, R. J. (2023). Selenium vitaminology: The connection between selenium, vitamin C, vitamin E, and ergothioneine. *Current Opinion in Chemical Biology*, *75*, 102328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2023.102328>
- Hussain, B., Lin, Q., Hamid, Y., Sanaullah, M., Di, L., ur Rehman Hashmi, M. L., Khan, M. B., He, Z., & Yang, X. (2020). Foliage application of selenium and silicon nanoparticles alleviates Cd and Pb toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Science of The Total Environment*, *712*, 136497. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136497>
- Iziy, E., Majd, A., Vaezi-Kakhki, M. R., Nejadstari, T., & Noureini, S. K. (2019). Effects of zinc oxide nanoparticles on enzymatic and nonenzymatic antioxidant content, germination, and biochemical and ultrastructural cell characteristics of *Portulaca oleracea* L. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, *88*(4). <https://doi.org/10.5586/ASBP.3639>
- Jin, T. Y., Li, S. Q., Jin, C. R., Shan, H., Wang, R. M., Zhou, M. X., Li, A. L., Li, L. Y., Hu, S. Y., Shen, T., & Xiang, L. (2018). Catecholic isoquinolines from *Portulaca oleracea* and their anti-inflammatory and β 2 -adrenergic receptor agonist activity. *Journal of Natural Products*, *81*(4), 768–777. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.7b00762>
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Cadenas-Pliego, G., Valdés-Reyna, J., Pinedo-Espinoza, J. M., López-Palestina, C. U., & Hernández-Fuentes, A. D. (2018). Foliar application of cu nanoparticles modified the content of bioactive compounds in *moringa oleifera* Lam. *Agronomy*, *8*(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy8090167>
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Morales-Díaz, A. B., González-Morales, S., Morelos-Moreno, Á., Cabrera-De la Fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Cadenas-Pliego, G., & Benavides-Mendoza, A. (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*(1). <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>
- Junglee, S., Urban, L., Sallanon, H., & Lopez-Lauri, F. (2014). Optimized assay for hydrogen peroxide determination in plant tissue using potassium iodide. *American Journal of Analytical Chemistry*, *05*(11), 730–736. <https://doi.org/10.4236/ajac.2014.511081>
- Kamali-Andani, N., Fallah, S., Peralta-Videa, J. R., & Golkar, P. (2023). Selenium nanoparticles reduce Ce accumulation in grains and ameliorate yield attributes in mung bean (*Vigna radiata*) exposed to CeO₂. *Environmental Pollution*, *316*, 120638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120638>

- Karimi, R., Ghabooli, M., Rahimi, J., & Amerian, M. (2020). Effects of foliar selenium application on some physiological and phytochemical parameters of *Vitis vinifera* L. cv. Sultana under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(14), 2226–2242. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1766072>
- Khai, H. D., Mai, N. T. N., Tung, H. T., Luan, V. Q., Cuong, D. M., Ngan, H. T. M., Chau, N. H., Buu, N. Q., Vinh, N. Q., Dung, D. M., & Nhut, D. T. (2022). Selenium nanoparticles as in vitro rooting agent, regulates stomata closure and antioxidant activity of gerbera to tolerate acclimatization stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 150(1), 113–128. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02250-3>
- Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., & Lim, S. M. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. En *Food and Nutrition Research* (Vol. 61). Swedish Nutrition Foundation. <https://doi.org/10.1080/16546628.2017.1361779>
- Kiumarzi, F., Morshedloo, M. R., Zahedi, S. M., Mumivand, H., Behtash, F., Hano, C., Chen, J.-T., & Lorenzo, J. M. (2022). Selenium nanoparticles (Se-NPs) alleviates salinity damages and improves phytochemical characteristics of pineapple mint (*Mentha suaveolens* Ehrh.). *Plants*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/plants11101384>
- Klein, B. P., & Perry, A. K. (1982). *Ascorbic Acid and Vitamin A Activity in Selected Vegetables from Different Geographical Areas of the United States*.
- Kumar, A., Sreedharan, S., Kashyap, A. K., Singh, P., & Ramchiary, N. (2022). A review on bioactive phytochemicals and ethnopharmacological potential of purslane (*Portulaca oleracea* L.). En *Heliyon* (Vol. 8, Número 1). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08669>
- Kumar, N., & Goel, N. (2019). Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00370>
- Lee, J. H., Park, J. E., & Han, J. S. (2020). *Portulaca oleracea* L. extract reduces hyperglycemia via PI3k/Akt and AMPK pathways in the skeletal muscles of C57BL/Ksj-db/db mice. *Journal of Ethnopharmacology*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.112973>
- Li, D., Zhou, C., Wu, Y., An, Q., Zhang, J., Fang, Y., Li, J.-Q., & Pan, C. (2022). Nanoselenium integrates soil-pepper plant homeostasis by recruiting rhizosphere-beneficial microbiomes and allocating signaling molecule levels under Cd stress. *Journal of Hazardous Materials*, 432, 128763. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128763>
- Liang, X., Tian, J., Li, L., Gao, J., Zhang, Q., Gao, P., & Song, S. (2014). Rapid determination of eight bioactive alkaloids in *Portulaca oleracea* L. by the optimal microwave extraction combined with positive-negative conversion multiple reaction

- monitor (+/-MRM) technology. *Talanta*, 120, 167–172.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.11.067>
- Lim, Y. Y., & Quah, E. P. L. (2007). Antioxidant properties of different cultivars of *Portulaca oleracea*. *Food Chemistry*, 103(3), 734–740.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.025>
- Lin, L. G., Liu, Q. Y., & Ye, Y. (2014). Naturally occurring homoisoflavonoids and their pharmacological activities. En *Planta Medica* (Vol. 80, Número 13, pp. 1053–1066). Georg Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1383026>
- Lin, Z. H., & Wang, C. R. C. (2005). Evidence on the size-dependent absorption spectral evolution of selenium nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 92(2–3), 591–594. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.02.023>
- Lira-Saldivar, R. H., Argüello, B. M., Villarreal, G. D. los S., & Reyes, I. V. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2), 9–24.
<https://doi.org/10.15174/au.2018.1575>
- Lu, J., Zheng, Y. L., Luo, L., Wu, D. M., Sun, D. X., & Feng, Y. J. (2006). Quercetin reverses d-galactose induced neurotoxicity in mouse brain. *Behavioural Brain Research*, 171(2), 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2006.03.043>
- Ma, Y., Bao, Y., Zhang, W., Ying, X., & Stien, D. (2020). Four lignans from *Portulaca oleracea* L. and its antioxidant activities. *Natural Product Research*, 34(16), 2276–2282. <https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1534852>
- Manojlović, M. S., Lončarić, Z., Cabilovski, R. R., Popović, B., Karalić, K., Ivezić, V., Ademi, A., & Singh, B. R. (2019). Biofortification of wheat cultivars with selenium. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 69(8), 715–724.
<https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1645204>
- Martins, W. B., Rodrigues, S. A., Silva, H. K., Dantas, C. G., De Lucca Júnior, W., Filho, L. X., Cardoso, J. C., & Gomes, M. Z. (2016). Neuroprotective effect of *Portulaca oleracea* extracts against 6-hydroxydopamine-induced lesion of dopaminergic neurons. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(3), 1439–1450.
<https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150574>
- Mera-Ovando, M. L., Bye-Boettler, A. R., Castro-Lara, D., & Villanueva-Verduzco, C. (2011). *Documento de diagnóstico de Portulaca oleracea L.*
- Mir, S. R., & Ali, M. (2016). Taraxerane-type triterpenoids from *Portulaca oleracea* Linn. seeds. En *Indian Journal of Chemistry* (Vol. 55).
- Mittler, R. (2017). ROS are good. *Trends in Plant Science*, 22(1), 11–19.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- Mohamed, A. I., & Hussein, A. S. (1994). *Chemical composition of purslane (Portulaca oleracea)*.

- Mohamed, D. A., Essa, H. A., & Mohamed, R. S. (2019). Purslane and garden cress seeds as source of unconventional edible oils for prevention of hyperlipidemia. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 22(11), 537–544. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2019.537.544>
- Montoya-García, C. O., Volke-Haller, V. H., Trinidad-Santos, A., & Villanueva-Verduzco, C. (2018). *Nutrient concentration of purslane (Portulaca oleracea L.) in response to NPK fertilization*.
- Montoya-García, C. O., Volke-Haller, V., Trinidad-Santos, A., Villanueva-Verduzco, C., & Sánchez-Escudero, J. (2017). *Respuesta de la verdolaga (Portulaca oleracea L.) a la fertilización con NPK*.
- Nayaka, H. B., Londonkar, R. L., Umesh, M. K., & Tukappa, A. (2014). Antibacterial Attributes of Apigenin, Isolated from *Portulaca oleracea* L. *International Journal of Bacteriology*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/175851>
- Nemzer, B., Al-Taher, F., & Abshiru, N. (2020). Phytochemical composition and nutritional value of different plant parts in two cultivated and wild purslane (*Portulaca oleracea* L.) genotypes. *Food Chemistry*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126621>
- Park, J. E., Seo, Y., & Han, J. S. (2021). HM-chromanone, a component of *Portulaca oleracea* L., stimulates glucose uptake and glycogen synthesis in skeletal muscle cell. *Phytomedicine*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2021.153473>
- Parry, O., Marksa, J. A., & Okwuasabab, F. K. (1993). The skeletal muscle relaxant action of *Portulaca* role of potassium ions. En *Journal of Ethnopharmacology* (Vol. 40).
- Pasquariello, M. S., Di Patre, D., Mastrobuoni, F., Zampella, L., Scortichini, M., & Petriccione, M. (2015). Influence of postharvest chitosan treatment on enzymatic browning and antioxidant enzyme activity in sweet cherry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 109, 45–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.06.007>
- Prabha, D., Sivakumar, S., Subbhuraam, C. V, & Son, H. K. (2015). Responses of *Portulaca oleracea* Linn. to selenium exposure. *Toxicology and Industrial Health*, 31(5), 412–421. <https://doi.org/10.1177/0748233713475502>
- Proietti, P., Nasini, L., Del Buono, D., D'Amato, R., Tedeschini, E., & Businelli, D. (2013). Selenium protects olive (*Olea europaea* L.) from drought stress. *Scientia Horticulturae*, 164, 165–171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.034>
- Rady, M. M., Desoky, E.-S. M., Ahmed, S. M., Majrashi, A., Ali, E. F., Arnaout, S. M. A. I., & Selem, E. (2021). Foliar nourishment with nano-selenium dioxide promotes physiology, biochemistry, antioxidant defenses, and Salt tolerance in *Phaseolus vulgaris*. *Plants*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/plants10061189>

- Rahman, K. (2007). Studies on free radicals, antioxidants, and co-factors. *Clinical Interventions in Aging*, 219–236.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). *Original contribution antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay.*
- Rezaei-Nazari, M., Abdossi, V., Zamani-Hargalani, F., & Larijani, K. (2022). The effect of nano selenium foliar application on some secondary metabolites of *Hypericum perforatum* L. *Journal of Medicinal Plants*, 21(81).
<https://doi.org/10.52547/jmp.21.81.67>
- Ross Ivan A. (2003). *Medicinal Plants of the World.*
- Ruiz-Torres, N. A., García-López, J. I., Lira Saldivar, R. H., Vera Reyes, I., & Méndez Arguello, B. (2016). *Efecto de nanopartículas metálicas y derivadas del carbón en la fisiología de semillas.*
- Saheri, F., Barzin, G., Pishkar, L., Boojar, M. M. A., & Babaeekhou, L. (2020). Foliar spray of salicylic acid induces physiological and biochemical changes in purslane (*Portulaca oleracea* L.) under drought stress. *Biologia*, 75(12), 2189–2200.
<https://doi.org/10.2478/s11756-020-00571-2>
- Samarghandian, S., Borji, A., & Farkhondeh, T. (2017). Attenuation of oxidative stress and Inflammation by *Portulaca oleracea* in streptozotocin-induced diabetic rats. *Journal of Evidence-Based Complementary & Alternative Medicine*, 22(4), 562–566.
<https://doi.org/10.1177/2156587217692491>
- Sánchez-Rodríguez, E., Leyva, R., Constán-Aguilar, C., Romero, L., & Ruiz, J. M. (2012). Grafting under water stress in tomato cherry: Improving the fruit yield and quality. *Annals of Applied Biology*, 161(3), 302–312. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2012.00574.x>
- Santiago-Saenz, Y. O., Hernández-Fuentes, A. D., Monroy-Torres, R., Cariño-Cortés, R., & Jiménez-Alvarado, R. (2018). Physicochemical, nutritional and antioxidant characterization of three vegetables (*Amaranthus hybridus* L., *Chenopodium berlandieri* L., *Portulaca oleracea* L.) as potential sources of phytochemicals and bioactive compounds. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(4), 2855–2864. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9900-7>
- Santiago-Saenz, Y. O., Monroy-Torres, R., Rocha-Amador, D. O., & Hernández-Fuentes, A. D. (2020). Effect of a supplementation with two quelites on urinary excretion of arsenic in adolescents exposed to water contaminated with the metalloid in a community in the state of Guanajuato, Mexico. *Nutrients*, 12(1).
<https://doi.org/10.3390/nu12010098>

- Sharma, I., & Ahmad, P. (2014). Chapter 4 - Catalase: A versatile antioxidant in plants. En P. Ahmad (Ed.), *Oxidative Damage to Plants* (pp. 131–148). Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00004-6>
- Sharma, S., Pareek, S., Sagar, N. A., Valero, D., & Serrano, M. (2017). Modulatory effects of exogenously applied polyamines on postharvest physiology, antioxidant system and shelf life of fruits: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, *18*(8).
<https://doi.org/10.3390/ijms18081789>
- Sheikhalipour, M., Esmailpour, B., Behnamian, M., Gohari, G., Giglou, M. T., Vachova, P., Rastogi, A., Brestic, M., & Skalicky, M. (2021). Chitosan–Selenium nanoparticle (Cs–Se NP) foliar spray alleviates salt stress in bitter melon. *Nanomaterials*, *11*(3).
<https://doi.org/10.3390/nano11030684>
- Sheikhalipour, M., Mohammadi, S. A., Esmailpour, B., Spanos, A., Mahmoudi, R., Mahdavinia, G. R., Milani, M. H., Kahnamoei, A., Nouraein, M., Antoniou, C., Kulak, M., Gohari, G., & Fotopoulos, V. (2023). Seedling nanoprimering with selenium-chitosan nanoparticles mitigates the adverse effects of salt stress by inducing multiple defence pathways in bitter melon plants. *International Journal of Biological Macromolecules*, *242*, 124923.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124923>
- Shi, M.-T., Zhang, T.-J., Fang, Y., Pan, C.-P., Fu, H.-Y., Gao, S.-J., & Wang, J.-D. (2023). Nano-selenium enhances sugarcane resistance to *Xanthomonas albilineans* infection and improvement of juice quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *254*, 114759. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114759>
- Shulaev, V., Cortes, D., Miller, G., & Mittler, R. (2008). Metabolomics for plant stress response. En *Physiologia Plantarum* (Vol. 132, Número 2, pp. 199–208).
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01025.x>
- Sicari, V., Loizzo, M. R., Tundis, R., Mincione, A., & Pellicanò, T. M. (2018). *Portulaca oleracea* L. (Purslane) extracts display antioxidant and hypoglycaemic effects. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *91*, 39–46.
<https://doi.org/10.5073/JABFQ.2018.091.006>
- Silva, R., & Carvalho, I. S. (2014). In vitro Antioxidant Activity, Phenolic Compounds and Protective Effect against DNA Damage Provided by Leaves, Stems and Flowers of *Portulaca oleracea* (Purslane). *Natural Product Communications*, *9*(1), 1934578X1400900115. <https://doi.org/10.1177/1934578X1400900115>
- Simopoulos, A. P., Artemis, D., & Simopoulos, P. (2004). BR omega-3 fatty acids and antioxidants in edible wild plants. *SIMOPOULOS Biol Res*, *37*, 263–277.
- Song, J., Yu, S., Yang, R., Xiao, J., & Liu, J. (2023). Opportunities for the use of selenium nanoparticles in agriculture. *NanoImpact*, *31*, 100478.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.impact.2023.100478>

- Thalassinou, G., Nastou, E., Petropoulos, S. A., & Antoniadis, V. (2021). Nitrogen effect on growth-related parameters and evaluation of *Portulaca oleracea* as a phytoremediation species in a Cr(VI)-spiked soil. *Horticulturae*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7070192>
- Tholl, D. (2015). Biosynthesis and biological functions of terpenoids in plants. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 148, 63–106. https://doi.org/10.1007/10_2014_295
- Tian, J. L., Liang, X., Gao, P. Y., Li, L. Z., & Song, S. J. (2015). Chemical Constituents of *Portulaca oleracea*. En *Chemistry of Natural Compounds* (Vol. 51, Número 4, pp. 760–761). Springer Science and Business Media, LLC. <https://doi.org/10.1007/s10600-015-1403-8>
- Uddin, M. K., Juraimi, A. S., Hossain, M. S., Nahar, M. A. U., Ali, M. E., & Rahman, M. M. (2014). Purslane weed (*Portulaca oleracea*): A prospective plant source of nutrition, omega-3 fatty acid, and antioxidant attributes. En *The Scientific World Journal* (Vol. 2014). ScientificWorld Ltd. <https://doi.org/10.1155/2014/951019>
- Valavanidis, A., & Vlachogianni, T. (2013). Plant polyphenols: Recent advances in epidemiological research and other studies on cancer prevention. En *Studies in Natural Products Chemistry* (Vol. 39, pp. 269–295). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62615-8.00008-4>
- Vanegas-Cano, L. J., Martínez-Peralta, S. T., Coy-Barrera, E., & Ardila-Barrantes, H. D. (2022). Early responses at symplastic stem level associated with the salicylic acid pathway in the interaction carnation (*Dianthus caryophyllus*, *caryophyllaceae*)-Fod (*Fusarium oxysporum* f. Sp. dianthi). *Acta Biologica Colombiana*, 27(2), 153–163. <https://doi.org/10.15446/ABC.V27N2.85778>
- Wang, M., Mu, C., Li, Y., Wang, Y., Ma, W., Ge, C., Cheng, C., Shi, G., Li, H., & Zhou, D. (2023). Foliar application of selenium nanoparticles alleviates cadmium toxicity in maize (*Zea mays* L.) seedlings: Evidence on antioxidant, gene expression, and metabolomics analysis. *Science of The Total Environment*, 899, 165521. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165521>
- Wang, M., Wang, Y., Ge, C., Wu, H., Jing, F., Wu, S., Li, H., & Zhou, D. (2023). Foliar Selenium Nanoparticles Application Promotes the Growth of Maize (*Zea mays* L.) Seedlings by Regulating Carbon, Nitrogen and Oxidative Stress Metabolism. *Scientia Horticulturae*, 311, 111816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111816>
- Waterman, P. G., & Mole, S. (1994). Analysis of phenolic plant metabolites. *Blackwell scientific publications*.
- Wu, B., Qi, F., & Liang, Y. (2023). Fuels for ROS signaling in plant immunity. *Trends in Plant Science*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.04.007>

- Xiang, L., Xing, D., Wang, W., Wang, R., Ding, Y., & Du, L. (2005). Alkaloids from *Portulaca oleracea* L. *Phytochemistry*, *66*(21), 2595–2601. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2005.08.011>
- Xu, X., Yu, L., & Chen, G. (2006). Determination of flavonoids in *Portulaca oleracea* L. by capillary electrophoresis with electrochemical detection. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, *41*(2), 493–499. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2006.01.013>
- Yan, J., Sun, L. R., Zhou, Z. Y., Chen, Y. C., Zhang, W. M., Dai, H. F., & Tan, J. W. (2012). Homoisoflavonoids from the medicinal plant *Portulaca oleracea*. *Phytochemistry*, *80*, 37–41. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2012.05.014>
- Yang, X., Zhang, W., Ying, X., & Stien, D. (2018). New flavonoids from *Portulaca oleracea* L. and their activities. *Fitoterapia*, *127*, 257–262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fitote.2018.02.032>
- Yuan, X., Li, C., Xie, J., Li, K., Chen, S., Yuan, L., Hu, C., Wang, X., & Zhao, X. (2022). Combination of selenium and methyl jasmonate controls postharvest tomato gray mold by damaging the membrane system. *Horticulturae*, *8*(9). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090782>
- Zhang, F., Li, X., Wu, Q., Lu, P., Kang, Q., Zhao, M., Wang, A., Dong, Q., Sun, M., Yang, Z., & Gao, Z. (2022). Selenium Application Enhances the Accumulation of Flavones and Anthocyanins in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *70*(41), 13431–13444. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04868>
- Zhao, C., Ying, Z., Tao, X., Jiang, M., Ying, X., & Yang, G. (2018). A new lactam alkaloid from *Portulaca oleracea* L. and its cytotoxicity. *Natural Product Research*, *32*(13), 1548–1553. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1385022>
- Zidan, Y., Bouderbala, S., Djellouli, F., Lacaille-Dubois, M. A., & Bouchenak, M. (2014). *Portulaca oleracea* reduces triglyceridemia, cholesterolemia, and improves lecithin: Cholesterol acyltransferase activity in rats fed enriched-cholesterol diet. *Phytomedicine*, *21*(12), 1504–1508. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2014.07.010>

14. ANEXOS

Anexo 1. Certificado de participación en “Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Hidalgo 2023”.

Universidad
Politécnica
Metropolitana de
Hidalgo

ACADEMIA JOURNALS
HIDALGO

PRODUCTOS Y SERVICIOS ESTRATÉGICOS
PARA INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PYSEIP
CENTRO DE INVESTIGACIÓN

Congreso Internacional de Investigación de
Academia Journals Hidalgo 2022

CERTIFICADO

otorgado a

**Lic. César Andrés Cabrera Cortés
Dr. Cesar Uriel López Palestina
Dr. José Manuel Pinedo Espinoza
Dr. Yair Olovaldo Santiago Sáenz
M.C.C. Matilde Reyes Fuentes
Dra. Alma Delia Hernández-Fuentes**

por su artículo titulado

Aplicación Foliar de Nanopartículas de Selenio en Verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) y su Efecto en la Calidad Poscosecha

(Artículo No. HHH167)

La ponencia correspondiente fue presentada en el congreso desarrollado los días 19, 20, y 21 de octubre de 2022, teniendo como sede las magníficas instalaciones de la Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo. El artículo está incluido en las siguientes publicaciones: (1) en el portal de Internet AcademiaJournals.com, con ISSN 1946-5351 online, Vol. 14, No. 08, 2022 e indexación en la base de datos [Fuente Académica Plus de EBSCOHOST](#), Massachusetts, Estados Unidos y (2) en el libro digital ebook titulado *Investigación para el Fortalecimiento de la Sociedad – Hidalgo 2022* con ISBN 978-1-939982-78-0 online.

Los organizadores del congreso reconocen la participación de los autores en el congreso, agradeciendo sus contribuciones.

DR. RAFAEL MORAS, P.E.
Editor, Academia Journals

HHH167 Congreso Academia Journals Hidalgo 2022
<https://www.academiajournals.com/Hidalgo>

Anexo 2. Trabajo en extenso de la participación en “Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Hidalgo 2023”.



OCTUBRE 19, 20, Y 21, 2022



Artículos del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Hidalgo 2022



ELIBRO ONLINE CON ISSN 1946-5351 | VOL. 14, NO. 8, 2022

Aplicación Foliar de Nanopartículas de Selenio en Verdolaga (*portulaca oleracea L.*) y su Efecto en la Calidad Poscosecha

César Andrés Cabrera-Cortés Lic.¹, Dr. César Uriel López-Palestina², Dr. José Manuel Pinedo-Espinoza³,
Dr. Yair Olovaldo Santiago-Saenz⁴, M.C.C. Matilde Reyes-Fuentes⁵, Dra. Alma Delia Hernández-Fuentes⁶

Resumen— La verdolaga es una suculenta con alto consumo en México, por su accesibilidad, propiedades nutricionales y contenidos fitoquímicos, por lo cual la producción ha ido en aumento en los últimos años. Sin embargo, se ha encontrado diferencias en calidad poscosecha en verdolagas cultivadas y silvestres. Por lo cual, este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de selenio (NPs Se) a diferentes concentraciones (0, 5, 50 y 500 ppm) sobre la calidad poscosecha en verdolaga durante su almacenamiento. Se encontró que la aplicación de NPs Se a 50 ppm reduce significativamente las pérdidas fisiológicas de peso durante el almacenamiento a 8 días. Por otra parte, la aplicación de NPs de Se mejora el contenido de clorofila las muestras superando al control (0 ppm NPs Se), sin embargo, las muestras tratamiento con 50 ppm de NPs Se conservan mayoritariamente este pigmento durante el almacenamiento. Los resultados muestran que 50 ppm de NPs Se, es la concentración más adecuada para preservar la calidad poscosecha en verdolaga, durante su almacenamiento.

Palabras clave—verdolaga, nanopartículas, selenio, aplicación foliar, poscosecha.

Introducción

La verdolaga (*Portulaca oleracea L.*) es una suculenta en algunos países considerada como arvense o maleza con un amplio consumo en la dieta la cual se consume en diversos platillos como estofados, ensaladas y sopas en zonas de Europa, países Mediterráneos y en diversas regiones de la República Mexicana. (Mohamed & Hussein, 1994). En México de acuerdo a las estadísticas oficiales del SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) reportaron que para el 2019 la superficie nacional destinada para la producción de verdolaga de 421 ha, de las que se cosechó casi el 100 % con una producción total del 5474.15 t (13.03 t ha⁻¹) y con un valor de producción de poco más de 26 MDP. Dentro de sus principales compuestos bioactivos encontramos ácidos fenólicos, flavonoides, terpenos, antocianinas, homoisoflavonoides, carotenoides, clorofila (Kumar *et al.* 2022). De ahí la importancia de su consumo y, por lo tanto, el incremento de la producción de verdolaga en un sistema productivo. Sin embargo, de acuerdo con Nezmer *et al.*, (2020), han demostrado que cuando la verdolaga se cultiva en un sistema de producción disminuyen considerablemente los contenidos nutricionales y fitoquímicos, en comparación a las verdolagas que crecen de manera silvestre, esto se debe a las situaciones de estrés que vive la planta de manera silvestre lo cual activa las rutas metabólicas que incrementan los compuestos bioactivos.

Por lo cual la aplicación de nanotecnología en el sector agroalimentario ha desarrollado herramientas novedosas para promover el incremento de compuestos bioactivos, así como el rendimiento y la calidad de los productos hortofrutícolas, como es el uso de nanopartículas de diferentes metales como Cu, Fe, Ag, Zn, entre otros, y el Se (Juárez-Maldonado *et al.*, 2018). El selenio no es esencial para las plantas, pero este elemento tiene beneficios a cantidades reducidas. Utilizado como biofortificador agronómico buscando la estimulación de proteínas, aminoácidos, microelementos, compuesto fenólicos, incrementando la capacidad antioxidante y prolongando la vida útil de los productos hortofrutícolas (Garduño-Zepeda & Márquez-Quiroz, 2018). El uso de nanopartículas a base de selenio (NPs Se) ha demostrado su aplicación en la mejora la biomasa, así como el rendimiento de las hortalizas de algunos cultivos (Gudkov *et al.*, 2020), además de aumentar la cantidad de pigmentos fotosintéticos en hojas lo cual

¹ César Andrés Cabrera Cortés Lic. Alumno de la Maestría en Ciencia de los Alimentos del Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos del Instituto de Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ca231843@uah.edu.mx

² El Dr. Cesar Uriel López Palestina es Profesor Investigador del Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos del Instituto de Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. cesar_lopez@uah.edu.mx

³ El Dr. José Manuel Pinedo Espinoza es Profesor de la Unidad Académica de Agronomía, Universidad Autónoma de Zacatecas, México. pinedozac_uaz@uaz.edu.mx

⁴ El Dr. Yair Olovaldo Santiago Sáenz es Profesor en el Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. yasir87@hotmail.com

⁵ La M.C.C. Matilde Reyes Fuentes es Profesora de la Escuela Superior de Tlahuelilpan, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. matyr_14@hotmail.com

⁶ La Dra. Alma Delia Hernández-Fuentes es Profesor Investigador del Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos del Instituto de Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. almah@uah.edu.mx