

Respuesta Morfológica y Fenológica de Plantas de Chile Pimiento a la Suplementación de Nanopartículas de Selenio Morphological and Phenological Response of Pepper Plants to Selenium Nanoparticles Supplementation

Juan José Reyes-Pérez¹, Luis Tarquino Llerena-Ramos¹, Juan Antonio Torres-Rodríguez²,
Sergio Rodríguez-Rodríguez² y María de los Angeles Sariñana-Navarrete^{3†}

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Av. Quito. km 1.5 vía a Santo Domingo. Quevedo. 120501 Los Ríos, Ecuador; (J.J.R.P.), (L.T.LI.R.), (J.A.T.R.).

² Universidad de Granma. Carretera Bayamo-Manzanillo km 17. 85149 Bayamo, Granma, Cuba; (S.R.R.).

³ Universidad Tecnológica de Rodeo, Academia de Agricultura Sustentable y Protegida. Carretera Federal Panamericana km 159.4. 35760, Rodeo, Durango, México; (M.A.S.N.).

† Autora para correspondencia: est_primo23@hotmail.com

RESUMEN

El cultivo de pimiento representa una actividad agrícola de importancia económica para las regiones de Ecuador, dado el incremento en el consumo y en la búsqueda de productos de calidad nutrimental y de buena apariencia. La nanotecnología emergente aplicada a la agricultura se visualiza como una forma segura y eficaz para el aprovechamiento de los recursos, ya sea como nanofertilizante o bioestimulante. El objetivo del presente estudio es evaluar el impacto de la aplicación foliar de nanopartículas de selenio (nSe) en la morfología, fenología y rendimiento del cultivo de chile pimiento, así como el índice de rentabilidad de la aplicabilidad de la nanotecnología en este sistema de cultivo. Los tratamientos de nSe consisten en aspersiones foliares a 10, 15 y 20 mg L⁻¹ y un tratamiento de control. Se evaluaron índices morfológicos, de calidad de fruto y la relación costo:beneficio de los tratamientos. Los resultados sugieren un impacto positivo de la aplicación de nSe en plantas de chile jalapeño; se mejora el desarrollo y crecimiento de las plantas (> 40%), la calidad física del fruto (> 20%) e incremento en el rendimiento, en más del 30%. Además, se muestra un ingreso neto superior a la producción convencional de chile pimiento al evidenciar una relación beneficio:costo de 4.91 al aplicar 20 mg L⁻¹ de nSe y presentar floraciones tempranas en plantas tratadas con nSe, impactando su precocidad.

Palabras clave: bioestimulación, precocidad, rendimiento, rentabilidad.

SUMMARY

Pepper cultivation represents an agricultural and economically important activity for the regions of Ecuador, given the increase in consumption and search for nutritional quality products with good appearance. Emerging nanotechnology applied to agriculture is seen as a safe and effective way to take advantage of resources, either as a nanofertilizer or as a biostimulant. Thus, the objective of the present study is to evaluate foliar selenium nanoparticle (nSe) application impact on pepper crop morphology, phenology, and yield, as well as the profitability index of nanotechnology applicability in this culture system. The nSe treatments consist of foliar sprays at 10, 15 and 20 mg L⁻¹ and a control treatment. Morphological indices, fruit quality, and benefit/cost ratio of the treatments were evaluated. The results suggest a positive nSe impact on jalapeño pepper plants, showing increases in plant growth (>40%), improvement in fruit physical quality (>20%), and a yield promotion by more than 30%. In addition, a higher net income than conventional pepper production has shown a benefit/cost ratio of 4.91 when applying 20 mg L⁻¹ of nSe. On the other hand, a precocity was noted in the plants, since they had significantly earlier blooms in the nSe treatments.

Index words: biostimulation, precocity, yield, profitability.



Cita recomendada:

Reyes-Pérez, J. J., Llerena-Ramos, L. T., Torres-Rodríguez, J. A., Rodríguez-Rodríguez, S., & Sariñana-Navarrete, M. A. (2025). Respuesta Morfológica y Fenológica de Plantas de Chile Pimiento a la Suplementación de Nanopartículas de Selenio. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-12. e2084. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2084>

Recibido: 2 de septiembre de 2024.
Aceptado: 1 de noviembre de 2024.
Artículo. Volumen 43.
Febrero de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Luis Hernández Adame

Editor Técnico:
Dr. David Cristóbal Acevedo



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

INTRODUCCIÓN

El género *Capsicum* perteneciente a la familia de las solanáceas, es originario de América del Sur, con génesis en áreas de Perú, Ecuador y Colombia (García-González y Silvar, 2020); representa uno de los géneros con más de 35 especies relevantes en términos de valor nutricional, ricas en metabolitos secundarios, como el ácido ascórbico, flavonoides, capsaicinoides, y otros compuestos fitoquímicos con propiedades nutraceuticas (Hernández-Pérez, del Gómez, Valverde y Paredes, 2020). Recientemente, el consumo global de los frutos de *Capsicum* ha experimentado un incremento, ocasionando una búsqueda en que el nivel de producción y exportación también se incrementen. Lo anterior ha generado una importante huella económica en las principales provincias productoras de Chile en Ecuador (Corrales-Sillo, Vásquez, Reyes y Espinoza, 2023). En este contexto, se presenta un desafío importante para la agricultura, ya que se debe incrementar la productividad haciendo un uso más eficiente los recursos materiales y naturales con que se disponen (Song, Yu, Yang, Xiao y Liu, 2023). El uso de nuevas tecnologías en combinación con las empleadas de forma convencional, representan una alternativa a los retos que enfrenta la agricultura.

La nanotecnología se ha abierto paso en la agricultura al desarrollar nanopartículas (NPs) inorgánicas u orgánicas, que aportan a la planta fertilizantes, plaguicidas u otro material, apropiados para promover la nutrición y el crecimiento, y con ello, garantizar la seguridad alimentaria y la calidad de los cultivos (Francis, Abdalla, Mahakham, Sarmah y Ahmed, 2024).

El Selenio (Se) es un micronutriente no metal esencial para el ser humano cuyo requerimiento diario oscila entre 55 y 400 µg (Rayman, 2019). Las nanopartículas de selenio (nSe) se muestran como una forma apropiada y segura de suplementar (Se) al ser humano, sin embargo, aplicado a los cultivos agrícolas, genera efectos bioestimulantes, que provocan la absorción y asimilación de nutrientes, lo que mejora el crecimiento de la planta y el fruto, mejora la capacidad antioxidante, promueve la germinación, incrementa el valor nutricional de los cultivos, y da resistencia a las plantas frente al estrés biótico y abiótico (Song *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023). La aplicación de nanomateriales en los cultivos ha generado importantes resultados en diferentes áreas de estudio. A nivel bioquímico, la aplicación de nSe indujo la actividad de las enzimas del sistema antioxidante de las plantas, además incrementó la concentración de metabolitos secundarios en frutos de tomate, desarrolladas en condiciones de estrés biótico por *Alternaria solani* (Quiterio-Gutiérrez *et al.*, 2019); por su parte Hernández-Hernández *et al.* (2019) reportan que la aplicación de 10 mg L⁻¹ de nSe incrementó el contenido de clorofila, metabolitos secundarios, y la actividad de enzimas antioxidantes en plantas de tomate desarrolladas en condiciones de crecimiento estándar, es decir, prácticas tradicionales de manejo del cultivo. A nivel de cultivo, Zahedi, Abdelrahman, Hosseini, Hoveizeh y Phan (2019a), señalan un incremento en el crecimiento y rendimiento del fruto en el cultivo de fresa al aplicar suplementación foliar de nSe, así como incremento en la cantidad de ácidos orgánicos y azúcares en estos, aun en condiciones de estrés ocasionado por salinidad.

Preciado-Rangel *et al.* (2021), analizaron la capacidad del selenito de sodio (Na₂SeO₃) para aumentar el rendimiento, biosíntesis de compuestos bioactivos y su acumulación en frutos de tomate. Los resultados mostraron que, la biofortificación se modificó positivamente con la biosíntesis de compuestos fitoquímicos y su concentración en fruto, pero disminuye el rendimiento de tomate. La incorporación de selenio en la solución nutritiva es una alternativa para incrementar la biosíntesis de compuestos fitoquímicos e incrementar la concentración de este elemento en los frutos del tomate con la posibilidad de mejorar la salud pública con su consumo.

En este contexto, debido a la importancia que representa el cultivo de Chile pimiento para la zona productiva de Ecuador, y los beneficios reportados por la huella de los nanomateriales en los cultivos, se presenta a las nSe como una alternativa de producción segura y benéfica, al promover el crecimiento y la calidad de los cultivos. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la suplementación con diferentes concentraciones de nSe en el crecimiento, rendimiento y precocidad del cultivo de Chile pimiento, así como la relación beneficio costo en la economía local.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material Vegetal y Localización del Área de Estudio

Se empleó semilla de pimiento (*Capsicum annuum* L.) de la variedad "Quetzal" (Seminis, Bayer Ltd.), que se caracteriza por tener frutos de 17 cm de largo y 5 cm de ancho aproximadamente, con pigmentación del pericarpio verde/rojo, medianamente alargado, y un periodo de maduración de 120 días después de la emergencia. El experimento se desarrolló en el invernadero de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (01° 06' 24" S, 79° 29' 70" O), zona caracterizada por tener una topografía plana (Figura 1). Las condiciones climáticas de la región se detallan en el Cuadro 1.

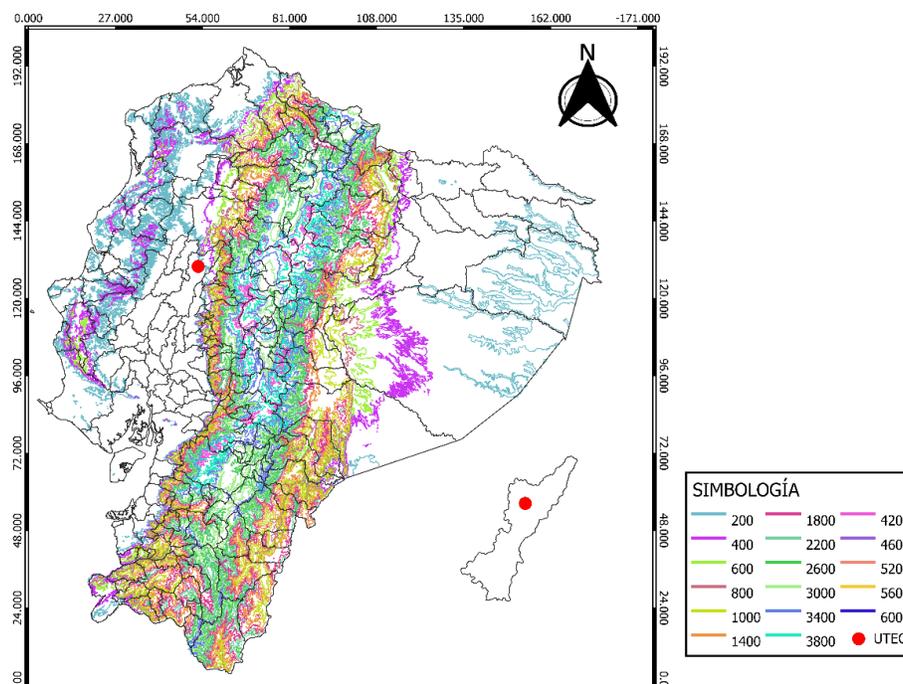


Figura 1. Límites territoriales y topografía de Ecuador. Los valores representan la elevación en metros de altitud.

Figure 1. Territorial limits and topography of Ecuador. The values represent the elevation in meters of altitude.

Obtención de Plántula

La siembra se realizó en bandejas germinadoras, empleando una mezcla de sustrato que consistió en suelo tamizado y compost (3:1), manteniendo la humedad constante hasta la emergencia del primer brote. Una vez que se tuvo el brote de la tercera hoja verdadera, las plántulas se trasplantaron a macetas de polietileno de 10×12 pulgadas y 2 mm de espesor, las cuales contenían 10 kg de sustrato.

Diseño Experimental y Aplicación de Tratamientos

Se emplearon nanopartículas de selenio (nSe) esféricas de 80 nm, a una concentración de 10, 15 y 20 mg L⁻¹. Cada tratamiento se conformó por cuatro repeticiones de cinco plantas, teniendo un total de 20 plantas por tratamiento, distribuidas en un arreglo experimental completamente al azar. Cada maceta contenía una planta, la cual se consideró como una unidad experimental. La aplicación de los tratamientos (10, 15 y 20 mg L⁻¹) fue mediante aspersiones al follaje, a los 12, 24 y 36 días después del trasplante (ddt). Para la aplicación del tratamiento control se suplementó una solución de agua desionizada, con la cantidad correspondiente a la cantidad empleada en los tratamientos de nSe. Previo a la aplicación de los tratamientos, las nSe se sometieron a agitación por ultrasonido durante 10 minutos para asegurar la homogeneidad de la solución.

Manejo Agronómico del Cultivo

Durante el desarrollo del cultivo en la etapa experimental, se llevaron a cabo actividades fitosanitarias. Al extremo de cada hilera se colocó alambre y piola para tutor de las plantas. El control de las malezas dentro de las macetas y dentro de la estructura fue manual. El riego se realizó 3 veces por semana, y se utilizó ácido pirroleñoso a una concentración de 2 L ha⁻¹ para el control de pulgón (*Aphis gossypii*). No se emplearon soluciones orgánicas o de origen sintético para el control de enfermedades en el cultivo.

Cuadro 1. Condiciones climáticas del sitio experimental.
Table 1. Climatic conditions of the experimental site.

Parámetro	Valor
Temperatura media anual	24.9 °C
Humedad relativa media anual	84%
Precipitación media anual	2295.1 mm
Heliofanía promedio anual	870.2 Hs
Zona ecológica	BH-T
Clima	Tropical húmedo

Fuente: Estación meteorológica "Pichilingue"-INAMHI.
 Source: "Pichilingue" meteorological station-INAMHI.

Evaluación de Índices Morfológicos y Fenológicos

La valoración morfológica del cultivo se realizó eligiendo aleatoriamente cuatro plantas por tratamiento, las cuales fueron marcadas y evaluadas a lo largo del desarrollo del experimento. Para valorar el diámetro del tallo, se empleó un calibrador pie de rey digital (500-192-30 Mutitoyo Co.). Los resultados se reportaron en milímetros (mm). La altura de la planta se midió empleando un flexómetro (FCN-55M, Truper®), se midió desde la base del tallo hasta la yema apical. Los resultados se reportaron en centímetros (cm). Ambas evaluaciones se realizaron en conjunto, a los 30, 45 y 60 días después de la siembra (dds). La estimación de la floración se realizó registrando el número de días transcurridos a partir de la siembra, hasta que el 50 + 1% de las plantas presentó la primera flor.

Calidad del Fruto y Rendimiento

La calidad del fruto se tomó en función del tamaño del fruto, el cual se determinó mediante la elección al azar de 5 frutos por tratamiento, se midió el diámetro polar y ecuatorial, empleando un calibrador pie de rey digital (500-192-30 Mutitoyo Co.). Los resultados se reportaron en cm. El número de frutos por planta se calculó mediante la cosecha de frutos comercialmente maduros tomados de 5 plantas por tratamiento, mismos que fueron utilizados para estimar el peso promedio del fruto, y el rendimiento. Los resultados se expresaron en g y kg ha⁻¹ respectivamente.

Análisis Económico

La estimación de la relación beneficio:costo (B:C) se realizó considerando el costo total de la producción de cada uno de los tratamientos evaluados, y los ingresos generados por la comercialización de los frutos cosechados; y así, determinar el valor monetario obtenido por la venta y lo invertido en la producción (Arévalo-Briones, Pastrano y Armijos, 2016). Para el cálculo de la relación B:C se utilizó la siguiente fórmula:

$$B:C = \frac{I.B.}{C.T.P} \quad (1)$$

Donde: B:C: relación beneficio-costo, I.B.: ingreso bruto, C.T.P.: costo total de producción, que incluye germinación, transplante, fertilización, suplementación con nSe, cosecha y comercialización.

Análisis Estadístico

Se realizaron pruebas de normalidad a los datos obtenidos. El efecto de los tratamientos se analizó con un análisis de varianza (ANDEVA), y una prueba de medias por el método Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Morfología y Fenología del Cultivo

En este estudio, la aplicación foliar de nSe influyó significativamente en la morfología de plantas de chile pimienta. Las mediciones realizadas a los 30 dds, evidencian un incremento en el grosor del tallo de las plantas tratadas con nSe. Este cambio permanece y se observa a lo largo del desarrollo del cultivo, evidenciando un aumento mayor al 30% en todos los tratamientos evaluados a los 45 dds, y superior al 25% a los 60 dds (Figura 2). En comparación con el tratamiento control, se cuantificó un incremento del 41.37, 48.27 y 58.62 % en el diámetro del tallo al aplicar 10, 15 y 20 mg L⁻¹ de nSe, respectivamente.

Por otra parte, la altura de las plantas se vio modificada por la aplicación foliar de nSe. Comparado con el tratamiento control, la evaluación de esta variable a los 30 dds evidencia un incremento significativo del 20.52, 22.53 y 27.99% al suplementar 10, 15 y 20 mg L⁻¹ de nSe, respectivamente. Este incremento se mantiene, y al finalizar la evaluación de la aplicación de nSe en las plantas utilizadas en esta investigación, se supera el metro de altura, obteniendo plantas de 107.25, 107.70 y 108.65 cm de altura en promedio, para los tratamientos de 10, 15 y 20 mg L⁻¹ de nSe, las cuales fueron significativamente más altas que aquellas plantas sin aplicación de nSe (94.90 cm), (Figura 3).

En este estudio, con la aplicación de nSe se observó un incremento en el diámetro del tallo, y la altura de las plantas en todas las concentraciones evaluadas, lo que podría indicar un incremento en el tamaño y grosor de las células de las plantas de chile pimienta (Figura 2 y 3), además de mostrar efectos de bioestimulación, y tolerancia a concentraciones de 20 mg L⁻¹ de nSe.

El tallo de las plantas superiores, es una estructura que tiene tamaño, consistencia y forma, así como una organización a nivel celular (Chuncho, Chuncho y Aguirre, 2019), y función específica, es el soporte mecánico descentralizado de éstas (Greb y Lohmaan, 2016), y la integridad estructural de las plantas depende de la pared celular presente en cada célula del tallo. El desarrollo de las células, esta modulado por factores como la cantidad de luz incidente, temperatura, disponibilidad de agua, estrés mecánico, o la concentración de iones presentes en el suelo; y que influyen directamente en las características de las células (Agustí y Blázquez, 2020). Por otra parte, Sattler y Rutishauser (1997) definen la morfología como "la investigación de la forma y estructura de una planta"; que, al ser sistemas complejos, la morfología afecta la fisiología, el crecimiento y el desarrollo. Sin embargo, la transformación morfológica de una planta puede verse afectada por sistemas radiculares vecinos o estímulos externos (Balduzzi et al., 2017).

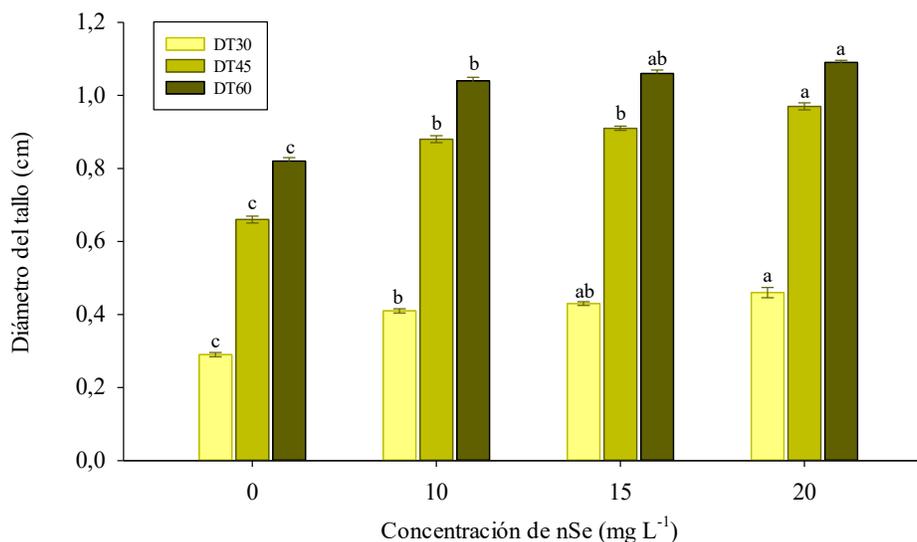


Figura 2. Diámetro del tallo de plantas de chile pimienta con aplicación de nanopartículas de selenio (nSe). DT30 = diámetro de tallo a los 30 DDS (días después de siembra; DT45 = diámetro de tallo a los 45 DDS; DT60 = diámetro de tallo a los 60 DDS. Diferentes letras entre columnas del mismo grupo de dds indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey $P \leq 0.05$). $n = 4 \pm$ error estándar.

Figure 2. Stem diameter of pepper plants with nSe (selenium) application. DT30 = stem diameter at 30 DAS (days after sowing); DT45 = stem diameter at 45 DAP; DT60 = stem diameter at 60 DAS. Different letters between columns of the same group indicate significant difference between treatments (Tukey's $P \leq 0.05$). $n = 4 \pm$ standard error (SE).

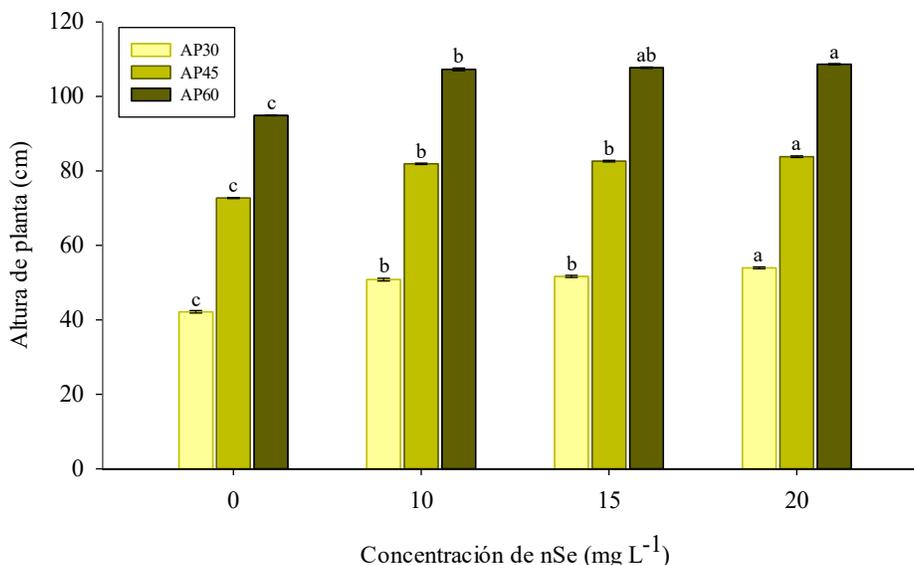


Figura 3. Altura de plantas de chile pimienta con aplicación de nSe (selenio). AP = altura de planta a los 30 DDS (días después de siembra); AP45 = altura de plantas a los 45 DDS; AP60 = altura de plantas a los 60 DDS. Diferentes letras entre columnas del mismo grupo de DDS indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey's $P \leq 0.05$). $n = 4 \pm$ error estándar.
Figure 3. Height of pepper plants with nSe (selenium) application. AP = plant height at 30 DAS (days after sowing); AP45 = plant height at 45 DAS; AP60 = plant height at 60 DAS. Different letters between columns of the same group indicate significant difference between treatments (Tukey $P \leq 0.05$). $n = 4 \pm$ standard error (SE).

En este contexto, se ha demostrado que el uso de nSe además de provocar una variedad de cambios fisiológicos y físicos que dependen de las propiedades de las NPs (Nazari, Abdossi, Hargalani y Larijani, 2022), contribuye al incremento en el grosor de la pared celular de las células de las plantas, e incrementar la cantidad de organelos celulares (Kang *et al.*, 2022), por lo que se espera, un cambio en las dimensiones de las estructuras morfológicas de las mismas. Investigaciones realizadas en otros cultivos de hortalizas se ha evidenciado un incremento en estos atributos. En plantas de *Cucumis sativus* L. (Shalaby *et al.*, 2021; Treviño-López *et al.*, 2021) y *Capsicum annum* L. (Sariñana-Navarrete *et al.*, 2023) la suplementación de nSe mejoró significativamente la altura de las plantas y otros atributos agronómicos. Otros cultivos como *Medicago sativa* L. (Zhang *et al.*, 2024), la aplicación de Se también evidenció un aumento en la altura de la planta, el diámetro del tallo, y el grosor de la corteza. Así mismo, Ahmad, Younas, Mashwani, Raja y Akram (2023) indican que un alto valor en el diámetro del tallo de las plantas es indicador de salud y desarrollo eficiente, al estar relacionado con las relaciones, de carbono, nutrición, y fenología de las plantas, así como de la capacidad de almacenamiento de agua (De Swaef, De Schepper, Vandegheuchte y Steppe, 2015), por lo que los hallazgos en este estudio indican una respuesta bioestimulante de las NPs sobre el cultivo de *C. annum* L.

Otra de las características de un cultivo, y que, a la hora de la práctica, y calendarización de actividades toma relevancia es la fenología de las plantas. En este estudio, se notó un cambio significativo en los días transcurridos en la floración del chile pimienta por la aplicación de nSe (Figura 4). Se aprecia que a mayores dosis de suplementación de nSe, el cultivo fue precoz, reduciendo en 13.93% los días necesarios para que ocurra el cambio de etapa vegetativa a etapa reproductiva, lo cual sugiere que el uso de nanomateriales se acelera el ciclo fenológico de las plantas (Segatto *et al.*, 2023). Al respecto Yue *et al.* (2022) señalan que la aplicación de NPs, además de regular significativamente los genes que regulan la biosíntesis de fitohormonas, regulan significativamente el gen *Sft* asociado a la floración en plantas de tomate generando una alta actividad del polen, incremento en el tamaño del óvulo, y por ende, un incremento significativo en el número de los frutos. Lo anterior sugiere un efecto positivo de los NPs en los cultivos a nivel molecular y bioquímico, respaldando en el presente estudio la floración temprana observada. Por ello, continuar evaluando la aplicación de nSe y la respuesta en la fenología de las plantas, es esencial, para estimar el cómo se involucra en el ciclo de vida y periodo productivo de los cultivos.

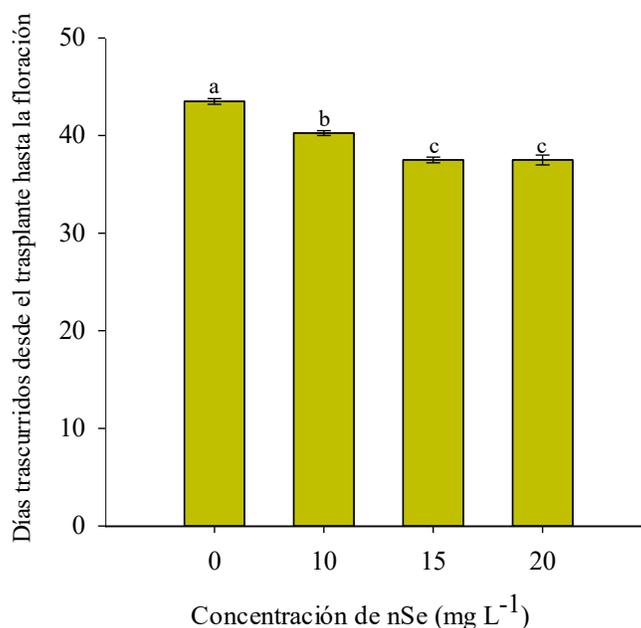


Figura 4. Días transcurridos desde el trasplante hasta la floración en plantas de chile pimienta con aplicación de nSe.

Diferentes letras entre columnas indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey's $P \leq 0.05$). $n = 4 \pm$ error estándar.

Figure 4. Days elapsed for the change from vegetative to reproductive stages in pepper plants with nSe application.

Different letters between columns indicate significant difference between treatments (Tukey's $P \leq 0.05$). $n = 4 \pm$ standard error.

Calidad del Fruto

Inicialmente, los frutos de un cultivo son juzgados por la apariencia, que refleja la combinación de la textura, color y proporciones (Callahan, 2002). En este estudio, la aplicación foliar de nSe en diferentes concentraciones influyó significativamente en el tamaño de los frutos de chile pimienta. Con respecto al tratamiento control, los frutos evaluados en los tratamientos de 10, 15 y 20 mg L⁻¹ de nSe favorecieron el incremento en 18.80, 31.65 y 34.51% en el diámetro ecuatorial, respectivamente. Este cambio también se observó en el diámetro polar, promovió incrementos significativos en más del 23% en todos los tratamientos de nSe evaluados, comparado con el control (Figura 5).

Una de las características que abarca la calidad de un fruto es la apariencia y el tamaño, y está en función del número, volumen y la densidad celular (Callahan, 2002). En este estudio, los tratamientos con nSe incrementaron significativamente el tamaño de los frutos de chile pimienta, sugiriendo un efecto de los nanomateriales en la morfología celular de las plantas. Otros estudios han encontrado que el nSe puede promover la calidad de los frutos; en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) se reporta un incremento significativo en el tamaño de los frutos con aplicación de 10 mg L⁻¹ de nSe (Liu et al., 2024). Así mismo, en el cultivo de granada (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) la aplicación de nSe a una concentración de 1 y 2 μM en dos ciclos de cultivo se observó un incremento en la longitud y el diámetro de los frutos (Zahedi, Hosseini, Meybodi y da Silva, 2019b). Finalmente, Almutairi et al. (2023) reportan un incremento en el tamaño de frutos de mango (*Mangifera indica* L.) como respuesta de las plantas a la aplicación de 10 y 20 mg L⁻¹ de nSe.

Los resultados de esta investigación y las evidencias de otras investigaciones en diferentes especies reflejan el efecto positivo de la aplicación de nSe, la cual depende del método de aplicación, la concentración empleada, la frecuencia suministrada y la época de aplicación (Danso et al., 2023), por lo que investigar la tolerancia del cultivo de pimienta a nSe es indispensable, para ser empleado como bioestimulante y biofortificante.

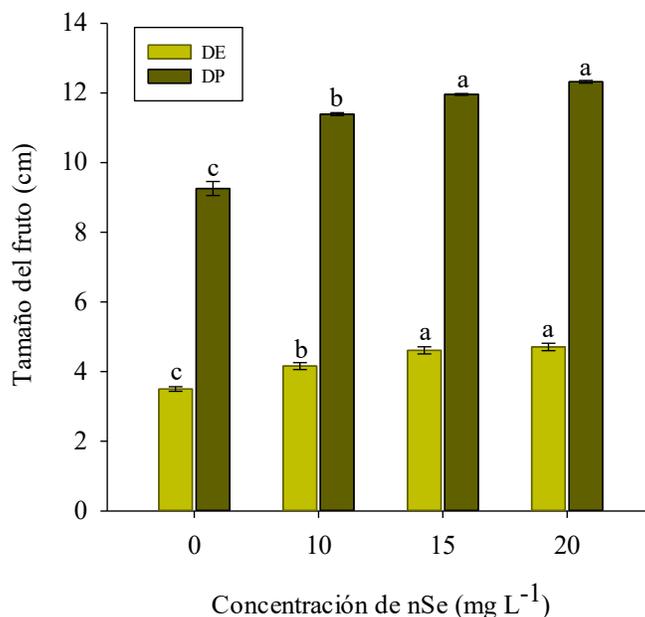


Figura 5. Tamaño de los frutos de chile pimienta con aplicación de nSe. DE = diámetro ecuatorial; DP = diámetro polar. Diferentes letras entre columnas del mismo grupo indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey $P \leq 0.05$). $n = 4 \pm$ error estándar.

Figure 5. Size of pepper fruits with application of nSe. ED = equatorial diameter; PD: polar diameter. Different letters between columns of the same group indicate significant difference between treatments (Tukey's $P \leq 0.05$). $n = 4 \pm$ standard error.

Rendimiento

Las plantas de chile pimienta mostraron una respuesta favorable a nSe en el contexto productivo al incrementar significativamente el rendimiento y todos sus componentes. Comparado con el tratamiento control, la aplicación foliar de 20 mg L⁻¹ de nSe incrementó en 2.7 el número de frutos por planta y 4.26 veces más, el rendimiento total por planta. Al extrapolar los resultados obtenidos por ha, se tuvo un incremento del 2.47 veces más, con una producción total de 44 194.00 kg ha⁻¹, mientras que el tratamiento control produjo 17 916.49 kg ha⁻¹ (Cuadro 2). Esta estimación significativa también se cuantificó en la dosis baja y media de nSe (10 y 15 mg L⁻¹), incrementando 1.89 y 2.02 veces más el rendimiento. En contraste a las variables mencionadas, se notó un cambio significativo en el peso promedio de los frutos obtenidos de plantas tratadas con dosis altas de nSe, al reducir en 8.52% el peso del fruto (59.01 g fruto⁻¹) respecto a frutos del tratamiento control (0 mg L⁻¹ de nSe; 64.50 g fruto⁻¹).

El Se se muestra como un elemento no esencial para las plantas superiores, sin embargo, parece ser un elemento benéfico para las plantas hiperacumuladoras de Se, a quienes ofrece un mejor crecimiento por una probable resistencia al estrés oxidativo (El-Ramady *et al.*, 2016). Además de ser considerado bioestimulante (Du Jardin, 2015), se ha planteado la teoría de la esencialidad del Se para las plantas no acumuladoras, puesto que, al usarse en concentraciones moderadas promueve el crecimiento y la acumulación de biomasa (Khan, Thounaojam, Chowdhury y Upadhyaya, 2023). La introducción del Se en una forma nanométrica ofrece una forma estable de Se para la aplicación como fertilizante y regulador del estrés en los cultivos agrícolas (Khan *et al.*, 2023).

En este estudio, la aplicación de nSe favoreció la productividad de plantas de chile pimienta, al incrementar el número de frutos por planta, y la estimación del rendimiento a nivel de cultivo (Cuadro 2). Estos resultados son similares a los reportados por Huang *et al.* (2024), quienes documentan un incremento significativo en el rendimiento de dos variedades de arroz, al aplicar 10 y 20 mg L⁻¹ de nSe. Del mismo modo, Sariñana-Navarrete *et al.* (2023), reportan un incremento en el rendimiento de más del 50% en el cultivo de chile jalapeño, con aplicación de 45 mg L⁻¹ de nSe. Una de las características de las nSe, es que generan más resultados comparado con su forma convencional, entre ellos, una promoción del metabolismo de los carbohidratos y biosíntesis de clorofila, y, por ende, una mayor abundancia de pigmentos fotosintéticos, mejorando el crecimiento, y el

Cuadro 2. Rendimiento y sus componentes en el cultivo de chile pimiento con aplicación de nSe.
Table 2. Yield and its components in chili pepper cultivation with nSe application.

Tratamiento nSe	Frutos por planta	Peso de los frutos cosechados	Peso promedio del fruto	Rendimiento
mg L ⁻¹	U	g	g	kg ha ⁻¹
0	5.00±0.001 d	322.50±6.45 d	64.50±1.29 ab	17 916.79±358.61 d
10	8.75±0.50 c	609.13±8.64 c	69.78±4.00 a	33 832.99±477.90 c
15	10.25±0.95 b	652.00±9.09 b	64.05±6.41 ab	36 221.86±505.11 b
20	13.50±0.55 a	795.50±4.80 a	59.01±2.51 b	44 194.00±266.43 a

Diferentes letras entre columnas del mismo grupo indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey's $P \leq 0.05$). n = 4 ± error estándar.
 Different letters between columns of the same group indicate significant difference between treatments (Tukey's $P \leq 0.05$). n = 4 ± standard error.

rendimiento de los cultivos, dependiendo de la especie (Huang *et al.*, 2024). Por otra parte, en este estudio se encontró una dinámica inversa entre el peso y el número de los frutos cosechados. Al respecto, Zahedi *et al.* (2019b) han encontrado una correlación negativa entre el peso y el número de frutos en arboles de granado, pudiendo indicar una distribución ecuánime de los fotoasimilados de la planta entre los principales órganos de demanda, como lo son los frutos (Sha *et al.*, 2021).

Rentabilidad del nSe en Chile Pimiento

En análisis B/C en los sistemas de producción permite valorar las inversiones con el propósito de mejorar e incrementar la producción, y facilitar la toma de decisiones en el ámbito financiero (Arévalo-Briones *et al.*, 2016)

La aplicación de nSe incrementó la relación B/C en todos los tratamientos evaluados. El análisis de B/C realizado en este experimento muestra un incremento de 2.29 veces más en la rentabilidad de producir pimientos con aplicación de 10 mg L⁻¹ de nSe, comparado con el tratamiento control, cuya rentabilidad fue de 1.59. Así mismo, al aplicar 15 mg L⁻¹ de nSe, se incrementó el costo de producción en 6.63% comparado con el control, sin embargo, el ingreso calculado de la comercialización del rendimiento proporcional al tratamiento fue de \$9 055.46, generando una utilidad favorable de \$7 210.01, y por consecuente, una rentabilidad del 3.91. De la misma manera, al aplicar 20 mg L⁻¹ de nSe, el indicador de rentabilidad calculado fue de 4.91, con un incremento del 8.07% en el costo de la producción, y un ingreso neto 3.33 veces mayor al ingreso neto de la producción sin aplicación de nSe (Cuadro 3).

La utilización de nanomateriales en la industria no deja de lado la participación en el ámbito agrícola. Las NPs pueden ser inorgánicas o de compuestos orgánicos, diseñadas para hacer una entrega más eficiente y efectiva de los nutrientes a las plantas (Yadav, Yadav y Abd-Elsalam, 2023). En este sentido, el uso de NPs a escala comercial puede beneficiar a la industria agrícola; además de mejorar el rendimiento, utilización de los recursos minerales (nutrimentos), y minimizar la pérdida de nutrientes por escorrentía, las NPs pueden incrementar la rentabilidad al mismo tiempo que se reduce el daño ambiental (Sári *et al.*, 2023; Yadav *et al.*, 2023; Zain *et al.*, 2024).

Cuadro 3. Estimación del beneficio:costo en la producción de chile pimiento con aplicación de nSe.
Table 3. Estimation of the benefit/cost in pepper production with application nSe.

Tratamiento nSe	Rendimiento	Ingreso bruto	Costo de producción	Ingreso neto	B/C
mg L ⁻¹	kg ha ⁻¹		\$		
0	17 916.49	4 479.12	1 730.70	2 748.42	1.59
10	33 832.99	8 458.24	1 820.45	6 637.79	3.65
15	36 221.86	9 055.46	1 845.45	7 210.01	3.91
20	44 194.00	11 048.50	1 870.45	9 178.05	4.91

CONCLUSIONES

El uso de nSe aplicado al follaje de plantas de chile pimiento mostró un efecto positivo en el desarrollo morfológico y reproductivo de las plantas, al influir positivamente en los parámetros de crecimiento, calidad de fruto y productividad en todas las concentraciones evaluadas, resaltando el tratamiento de 20 mg L⁻¹ de nSe. Así mismo, la relación B:C fue rentable en el cultivo de chile jalapeño. La aplicación de nSe tuvo efecto sobre la floración, haciendo que estas fueran precoces, cualidad de importancia para este cultivo. En necesario evaluar concentraciones más altas de nSe en el cultivo para estimar el punto máximo de tolerancia.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Proyecto PFOC9-07-2023-FOCICYT.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.J.R.P., L.T.LI.R. y S.R.R. Metodología: J.J.R.P. y J.A.T.R. Validación: M.A.S.N. y S.R.R. Análisis formal: J.J.R.P. y M.A.S.N. Investigación: M.A.S.N. Recursos: J.J.R.P. y J.A.T.R. Curación de datos: L.T.LI.R. y M.A.S.N. Escritura, preparación del borrador original: J.J.R.P. y M.A.S.N. Escritura, revisión y edición: J.J.R.P., S.R.R. y M.A.S.N. Visualización: J.J.R.P., L.T.LI.R. y S.R.R. Administración del proyecto: J.J.R.P. Adquisición de fondos: J.J.R.P.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por el apoyo otorgado a través del Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 9na Convocatoria, a través del proyecto PFOC9-07-2023 "Respuesta de cultivos hortícolas a la aplicación de selenio bajo condiciones controladas".

LITERATURA CITADA

- Agustí, J., & Blázquez, M. A. (2020). Plant vascular development: mechanisms and environmental regulation. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 77, 3711-3728. <https://doi.org/10.1007/s00018-020-03496-w>
- Ahmad, I., Younas, Z., Mashwani, Z. U. R., Raja, N. I., & Akram, A. (2023). Phytomediated selenium nanoparticles improved physio-morphological, antioxidant, and oil bioactive compounds of sesame under induced biotic stress. *ACS Omega*, 8(3), 3354-3366. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07084>
- Almutairi, K. F., Górnik, K., Awad, R. M., Ayoub, A., Abada, H. S., & Mosa, W. F. (2023). Influence of selenium, titanium, and silicon nanoparticles on the growth, yield, and fruit quality of mango under drought conditions. *Horticulturae*, 9(11), 1231. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111231>
- Arévalo-Briones, K. P., Pastrano-Quintana, E., & Armijos-Jumbo, V. (2016). Relación beneficio-costo por tratamiento en la producción orgánica de las hortalizas (Cilantro, Lechuga, Cebolla Roja, Cebolla de Rama) en el cantón Santo Domingo de Los Colorados. *Revista Publicando*, 3(7), 503-528
- Balduzzi, M., Binder, B. M., Bucksch, A., Chang, C., Hong, L., Iyer-Pascuzzi, A. S., ... & Sparks, E. E. (2017). Reshaping plant biology: qualitative and quantitative descriptors for plant morphology. *Frontiers in Plant Science*, 8, 117. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00117>

- Callahan, A. M. (2002). Breeding for Fruit Quality. In J. Janick (Ed.). *XXVI International Horticultural Congress: Genetics and Breeding of Tree Fruits and Nuts 622. Breeding for fruit quality* (pp. 295-302). Toronto, Canada: ISHS. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.622.27> ISBN-978-9978-355-57-2
- Chuncho, G., Chuncho, C., & Aguirre, Z. (2019). *Anatomía y morfología vegetal*. Ecuador: Universidad Nacional de Loja. ISBN: 978-9978-355-57-2
- Corrales-Sillo, E. E., Vásconez-Montufar, G. H., Reyes-Bermeo, M. d. R., & Espinoza-Coronel, A. L. (2023). Use of organic fertilizers in the production of *Capsicum annum* L. in the western mountain range of the Andes. *Centrosur*, 1(19), 24-37.
- Danso, O. P., Asante-Badu, B., Zhang, Z., Song, J., Wang, Z., Yin, X., & Zhu, R. (2023). Selenium Biofortification: Strategies, Progress and Challenges. *Agriculture*, 13(2), 416. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020416>
- De Swaef, T., De Schepper, V., Vandeghechuchte, M. W., & Steppe, K. (2015). Stem diameter variations as a versatile research tool in ecophysiology. *Tree Physiology*, 35(10), 1047-1061. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv080>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L. A., Tablada, E. M., & Robledo, C. W. (2016). *InfoStat versión 2020*. software estadístico. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat.
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- El-Ramady, H., Abdalla, N., Taha, H. S., Alshaal, T., El-Henawy, A., Faizy, S. E. D. A., ... & Schnug, E. (2016). Selenium and nano-selenium in plant nutrition. *Environmental Chemistry Letters*, 14, 123-147. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0535-1>
- Francis, D. V., Abdalla, A. K., Mahakham, W., Sarmah, A. K., & Ahmed, Z. F. (2024). Interaction of plants and metal nanoparticles: Exploring its molecular mechanisms for sustainable agriculture and crop improvement. *Environmental International*, 108859. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108859>
- García-González, C. A., & Silvar, C. (2020). Phytochemical Assessment of Native Ecuadorian Peppers (*Capsicum* spp.) and Correlation Analysis to Fruit Phenomics. *Plants*, 9(8), 986. <https://doi.org/10.3390/plants9080986>
- Greb, T., & Lohmann, J. U. (2016). Plant stem cells. *Current Biology*, 26(17), 816-821. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.07.070>
- Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., Cabrera de la Fuente, M., ... & Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 355. <https://doi.org/10.3390/plants8100355>
- Hernández-Pérez, T., del Gómez-García, M., Valverde, M. E., & Paredes-López, O. (2020). *Capsicum annum* (hot pepper): an ancient Latin American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2972-2993. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12634>
- Huang, S., Qin, H., Jiang, D., Lu, J., Zhu, Z., & Huang, X. (2024). Bio-nano selenium fertilizer improves the yield, quality, and organic selenium content in rice. *Journal of Food Composition and Analysis*, 132, 106348. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106348>
- Kang, L., Wu, Y., Zhang, J., An, Q., Zhou, C., Li, D., & Pan, C. (2022). Nano-selenium enhances the antioxidant capacity, organic acids and cucurbitacin B in melon (*Cucumis melo* L.) plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 241, 113777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113777>
- Khan, Z., Thounaojam, T. C., Chowdhury, D., & Upadhyaya, H. (2023). The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: a review. *Plant Growth Regulation*, 100(2), 409-433. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0>
- Liu, Y., Liu, R., Li, F., Yu, S., Nie, Y., Li, J. Q., ... & Diao, J. (2024). Nano-selenium repaired the damage caused by fungicides on strawberry flavor quality and antioxidant capacity by regulating ABA biosynthesis and ripening-related transcription factors. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 198, 105753. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105753>
- Nazari, M. R., Abdossi, V., Hargalani, F. Z., & Larijani, K. (2022). Antioxidant potential and essential oil properties of *Hypericum perforatum* L. assessed by application of selenite and nano-selenium. *Scientific Reports*, 12(1), 6156. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10109-y>
- Preciado-Rangel, P., Hernández-Montiel, L. G., Valdez-Cepeda, R. D., de la Cruz-Lázaro, E., Lara-Capistrán, L., Morales-Morales, B., & Gaucín-Delgado, J. M. (2021). Biofortification with selenium increases bioactive compounds and antioxidant capacity in tomato fruits. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.979>
- Quiterio-Gutiérrez, T., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Hernández-Fuentes, A. D., Sandoval-Rangel, A., Benavides-Mendoza, A., ... & Juárez-Maldonado, A. (2019). The Application of Selenium and Copper Nanoparticles Modifies the Biochemical Responses of Tomato Plants Under Stress by *Alternaria solani*. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(8), 1950. <https://doi.org/10.3390/ijms20081950>
- Rayman, M. P. (2019). Selenium intake, status, and health: A complex relationship. *Hormones*, 19(1), 9-14. <https://doi.org/10.1007/s42000-019-00125-5>
- Sári, D., Ferroudj, A., Muthu, A., Prokisch, J., El-Ramady, H., Elsakhawy, T. A., ... & Brevik, E. (2023). Nano-Enabled Agriculture Using Nano-Selenium for Crop Productivity: What Should be Addressed More? *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 7(2023), 85-99. <https://dx.doi.org/10.21608/jenvbs.2023.205664.1215>
- Sariñana-Navarrete, M. A., Morelos-Moreno, A., Sánchez, E., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Preciado-Rangel, P. (2023). Selenium Nanoparticles Improve Quality, Bioactive Compounds and Enzymatic Activity in Jalapeño Pepper Fruits. *Agronomy*, 13(3), 652. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030652>
- Sattler, R., & Rutishauser, R. (1997). The Fundamental Relevance of Morphology and Morphogenesis to Plant Research. *Annals of Botany*, 80(5), 571-582.
- Segatto, C., Souza, C. A., Fiori, M. A., Lajús, C. R., Silva, L. L., & Riella, H. G. (2023). Seed treatment with magnesium nanoparticles alters phenology and increases grain yield and mineral content in maize. *Australian Journal of Crop Science*, 17(2), 165-178. <https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.02.p3734>
- Sha, J., Wang, F., Chen, Q., Jia, Z., Du, X., Ge, S., ... & Jiang, Y. (2021). Characteristics of photoassimilates transportation and distribution to the fruits from leaves at different branch positions in apple. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 1222-1232. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10182-5>
- Shalaby, T. A., Abd-Elkarim, E., El-Aidy, F., Hamed, E. S., Sharaf-Eldin, M., Taha, N., ... & Dos Reis, A. R. (2021). Nano-selenium, silicon and H₂O₂ boost growth and productivity of cucumber under combined salinity and heat stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111962. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111962>
- 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/10.1016/j.impact.2023.100478>
- Treviño-López, E. A., Sandoval-Rangel, A., Benavides-Mendoza, A., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., & Cabrera-de la Fuente, M. (2021). Nanopartículas de selenio absorbidas en hidrogeles de quitosán-polivinil alcohol en la producción de pepino injertado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26, 159-169. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2946>

- Yadav, A., Yadav, K., & Abd-Elsalam, K. A. (2023). Exploring the potential of nanofertilizers for a sustainable agriculture. *Plant Nano Biology*, 5, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100044>
- Yue, L., Feng, Y., Ma, C., Wang, C., Chen, F., Cao, X., ... & Xing, B. (2022). Molecular mechanisms of early flowering in tomatoes induced by manganese ferrite (MnFe₂O₄) nanomaterials. *ACS Nano*, 16(4), 5636-5646. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c10602>
- Zahedi, S. M., Abdelrahman, M., Hosseini, M. S., Hoveizeh, N. F., & Phan-Tran, L. S. (2019a). Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles. *Environmental Pollution*, 253, 246-258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.078>
- Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Meybodi, N. D. H., & da Silva, J. A. T. (2019b). Foliar application of selenium and nano-selenium affects pomegranate (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) fruit yield and quality. *South African Journal of Botany*, 124, 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.019>
- Zain, M., Ma, H., Chaudhary, S., Nuruzaman, M., Azeem, I., Mehmood, F., ... & Sun, C. (2023). Nanotechnology in precision agriculture: Advancing towards sustainable crop production. *Plant Physiology and Biochemistry*, 206, 108244. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108244>
- Zhang, S., Zhu, H., Wang, L., Zhang, Y., Cen, H., & Xu, T. (2024). Effects of Selenium on the Lignin Deposition Pattern and Stem Mechanical Properties of Alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(17), 9923-9936. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c06684>
- Zhang, T., Qi, M., Wu, Q., Xiang, P., Tang, D., & Li, Q. (2023). Recent research progress on the synthesis and biological effects of selenium nanoparticles. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1183487. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1183487>