

## Efecto de nanopartículas de Silicio en caracteres agronómicos en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.)

Effect of silicon nanoparticles on agronomic traits in pepper plants (*Capsicum annuum* L.)

Efeito das nanopartículas de silício nas características agronômicas das plantas de pimenta (*Capsicum annuum* L.)

Solis-Pérez, Jennifer Maribel  
Investigadora independiente  
[jennifersolis2016@gmail.com](mailto:jennifersolis2016@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0003-6594-6817>



Galarza-Vera, Adriana Nicole  
Investigadora independiente  
[adriananicolegalarzavera@gmail.com](mailto:adriananicolegalarzavera@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-4072-4738>



Toapanta-Garces, Katteryn Lissett  
Investigadora independiente  
[ktoapantag2505@gmail.com](mailto:ktoapantag2505@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0006-3215-3169>



Vintimilla-Quintana, Valeria Paulina  
Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP)  
[valeria.vintimilla@iniap.gob.ec](mailto:valeria.vintimilla@iniap.gob.ec)  
<https://orcid.org/0009-0005-2380-3249>



Vera-Herrera, Winter Abel  
Investigador independiente  
[winterabel@hotmail.es](mailto:winterabel@hotmail.es)  
<https://orcid.org/0009-0000-4180-9744>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/nE1/1376>

### Como citar:

Solis-Pérez, J. M., Galarza-Vera, A. N., Toapanta-Garces, K. L., Vintimilla-Quintana, V. P., & Vera-Herrera, W. A. (2026). Efecto de nanopartículas de Silicio en caracteres agronómicos en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Código Científico Revista De Investigación*, 7(E1), 2467-2490.

Recibido: 11/02/2026

Aceptado: 10/03/2026

Publicado: 31/03/2026

### Resumen

Las nanopartículas de Silicio han mostrado efectos positivos en las plantas, estimula el crecimiento y aumenta la calidad de los cultivos. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de nanopartículas de Silicio en caracteres agronómicos en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). Se empleó un diseño completamente al azar (DCA), con cuatro tratamientos, cinco repeticiones. Como resultados se encontró que el T2 (250 mg L<sup>-1</sup>), presentó el menor tiempo de floración (31,20 días). El tratamiento T4 (1000 mg L<sup>-1</sup>) alcanzó la mayor altura de planta (114,50 cm), diámetro de tallo (1,22 cm - 90 días). En cuanto a la producción, también registró el mayor número de frutos por planta (6,80), cantidad de frutos sanos (6,74) y la menor cantidad de frutos dañados (0,06). Los frutos tuvieron un peso de 109,30 g, un diámetro de 5,62 cm y una longitud de 12,25 cm. La biomasa de hojas fue mayor, tanto fresca (135,20 g) como seca (40,60 g), tallos (129,40 g fresca y 47,00 g seca) y raíz (111,40 g fresca y 48,60 g seca). El rendimiento por hectárea, alcanzó 9205,4 kg ha<sup>-1</sup> con un B/C de 2,13. La aplicación de nanopartículas de Silicio mejoró significativamente el crecimiento y productividad del cultivo.

**Palabras clave:** calidad de frutos, sanidad vegetal, análisis económico, bioestimulantes.

### Abstract

Silicon nanoparticles have shown positive effects on plants, stimulating growth and increasing crop quality. The aim of this research was to evaluate the effect of silicon nanoparticles on agronomic characteristics in pepper plants (*Capsicum annuum* L.). A completely randomised design (CRD) was used, with four treatments and five replicates. The results showed that T2 (250 mg L<sup>-1</sup>) had the shortest flowering time (31.20 days). Treatment T4 (1000 mg L<sup>-1</sup>) achieved the highest plant height (114.50 cm) and stem diameter (1.22 cm - 90 days). In terms of production, it also recorded the highest number of fruits per plant (6.80), number of healthy fruits (6.74) and the lowest number of damaged fruits (0.06). The fruits weighed 109.30 g, had a diameter of 5.62 cm and a length of 12.25 cm. The biomass of leaves was higher, both fresh (135.20 g) and dry (40.60 g), stems (129.40 g fresh and 47.00 g dry) and roots (111.40 g fresh and 48.60 g dry). The yield per hectare reached 9205.4 kg ha<sup>-1</sup> with a B/C of 2.13. The application of silicon nanoparticles significantly improved crop growth and productivity.

**Keywords:** fruit quality, plant health, economic analysis, biostimulants.

### Resumo

As nanopartículas de silício têm demonstrado efeitos positivos nas plantas, estimulando o crescimento e aumentando a qualidade das culturas. O objetivo desta investigação foi avaliar o efeito das nanopartículas de silício nas características agronômicas das plantas de pimenta (*Capsicum annuum* L.). Foi utilizado um delineamento completamente aleatório (DCA), com quatro tratamentos e cinco repetições. Os resultados mostraram que o T2 (250 mg L<sup>-1</sup>) apresentou o menor tempo de floração (31,20 dias). O tratamento T4 (1000 mg L<sup>-1</sup>) alcançou a maior altura da planta (114,50 cm) e o maior diâmetro do caule (1,22 cm - 90 dias). Em termos de produção, registou também o maior número de frutos por planta (6,80), o maior número de frutos saudáveis (6,74) e o menor número de frutos danificados (0,06). Os frutos pesavam 109,30 g, tinham um diâmetro de 5,62 cm e um comprimento de 12,25 cm. A biomassa das folhas foi superior, tanto fresca (135,20 g) como seca (40,60 g), dos caules (129,40 g fresca e 47,00 g seca) e das raízes (111,40 g fresca e 48,60 g seca). O rendimento por hectare atingiu 9205,4 kg ha<sup>-1</sup> com um B/C de 2,13. A aplicação de nanopartículas de silício melhorou significativamente o crescimento e a produtividade da cultura.

**Palavras-chave:** qualidade dos frutos, fitossanidade, análise econômica, bioestimulantes.

## Introducción

*Capsicum annuum* L. es una planta de gran relevancia tanto a nivel económico como nutricional en todo el mundo, siendo fundamental para la alimentación humana (Shilpa et al., 2024). En Ecuador, el pimiento se cultiva a distintas escalas, desde pequeñas hasta grandes extensiones, y ha sido un cultivo que impulsa el desarrollo agrícola del país (Franco et al., 2021). Actualmente, se cosechan cerca de 5500 toneladas en unas 1700 hectáreas, pero la producción ha mostrado una tendencia decreciente debido a las plagas, que afectan tanto el rendimiento como la calidad del pimiento (Esmeraldas et al., 2021).

En la provincia de Los Ríos, particularmente en áreas agrícolas del cantón Quevedo, el cultivo de *Capsicum annuum* L. presenta problemas fitosanitarios relevantes. Investigaciones en Ecuador indican la infestación de ácaros como *Polyphagotarsonemus latus*, que reducen hasta un 50 % la fotosíntesis neta, lo que representa una limitante importante para el rendimiento del cultivo (Ortega et al., 2022). Asimismo, se reconoce a los trips, ácaros y mosca blanca como plagas críticas en pimiento dulce, ya que afectan la sanidad, calidad y productividad de los frutos (Vélez-Ruiz et al., 2022).

El cultivo de pimiento enfrenta diversos problemas fitosanitarios que pueden comprometer su rendimiento y calidad (Sotomayor et al., 2025). Estos problemas incluyen tanto factores bióticos como abióticos, así como diferentes plagas y enfermedades que atacan las plantas en diferentes etapas de su desarrollo. Es susceptible a plagas y enfermedades como ácaros, trips, infecciones virales y fúngicas, incluyendo la pudrición de los frutos y el mildiú polvoriento (Quispe-Quispe et al., 2022).

En este contexto, el uso de nanopartículas en el sector agrícola ha despertado gran interés en la investigación, ya que ofrecen un gran potencial para optimizar los procesos productivos, disminuir el uso de agroquímicos y mejorar el rendimiento de los cultivos (Vargas-Ruíz et al., 2022). La nanotecnología es una herramienta que permite manipular

elementos a escala nanométrica, ofreciendo nuevas posibilidades en campos como la agricultura (Flores-Hernández et al., 2021). En el ámbito agrícola, estas nanopartículas han demostrado ser útiles por su tamaño y características exclusivas, lo que las hace comparables a biomoléculas como las proteínas o los ácidos nucleicos, mejorando la eficiencia de procesos agrícolas y la resistencia de los cultivos frente a distintos tipos de estrés (Galindo-Guzmán et al., 2022).

El silicio es un nutriente esencial en los cultivos hortícolas, ya que aumenta la productividad de las plantas y fortalece su resistencia frente a diversos factores bióticos y abióticos (Roychoudhury, 2020). Las nanopartículas de silicio han mostrado efectos positivos en las plantas, como mejorar la germinación, estimular el crecimiento y aumentar la calidad de los cultivos (Pambudi et al., 2023). Diversas investigaciones han demostrado que estas nanopartículas pueden favorecer múltiples aspectos del desarrollo vegetal cuando se aplican a las plantas (Klotz et al., 2021). Las nanopartículas de silicio son altamente eficaces como sustratos y se utilizan como soportes para disminuir la cantidad de compuestos químicos en los ingredientes activos (Lata-Tenesaca et al., 2024).

Estas partículas pueden fijarse en los tejidos de las plantas, confiriéndoles características hidrofóbicas (Christian et al., 2022), y actúan como adsorbentes, con aplicaciones potenciales en la eliminación de colorantes como el azul de metileno y la remoción de contaminantes del suelo (Ranjan et al., 2021). Entre los beneficios observados se encuentran un aumento en la lignificación, mayor biomasa, altura, floración, y una mejor absorción de nutrientes y agua (Sabir et al., 2024). Ante lo expuesto la investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de nanopartículas de Silicio en caracteres agronómicos en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.).

## Metodología

La investigación se realizó en el invernadero del Campus La María de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicado en el kilómetro 7,5 de la vía Quevedo–Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador, a una altitud aproximada de 75 m s. n. m. El sitio presentó un clima tropical húmedo, con temperatura media anual de 24,9 °C, humedad relativa promedio de 84 % y precipitación anual cercana a 2 295 mm. El estudio fue de tipo experimental, con nivel explicativo y modalidad de investigación de campo bajo condiciones de invernadero. Se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de nanopartículas de silicio sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.).

El experimento se estableció bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA), con cuatro tratamientos y cinco repeticiones. Los tratamientos consistieron en un control sin aplicación y tres dosis de nanopartículas de silicio (250, 500 y 1 000 mg L<sup>-1</sup>). Cada unidad experimental estuvo conformada por 10 plantas, totalizando 50 plantas por tratamiento. El sustrato se preparó en una proporción 3:1:1 (tierra negra cernida, aserrín de madera y arena de río lavada) y se colocó en fundas de polietileno negro de 10 × 12 pulgadas, con aproximadamente 10 kg de sustrato por unidad. Las semillas del híbrido comercial ‘Nathalie’ se germinaron en bandejas de 100 cavidades y el trasplante se realizó a los 21 días después de la siembra, cuando las plántulas presentaron tres hojas verdaderas.

El manejo agronómico incluyó tutoreo con alambre galvanizado y piola de polipropileno para mantener el crecimiento vertical de las plantas, control manual de malezas con frecuencia quincenal y riego por aspersión manual tres veces por semana para mantener niveles adecuados de humedad. La fertilización se aplicó de forma fraccionada conforme a los tratamientos establecidos, distribuyendo las dosis en tres momentos (10, 20 y 30 días después del trasplante). El control fitosanitario se realizó mediante aplicaciones preventivas de ácido piroleñoso al 2 % para el manejo de insectos plaga y la aplicación del fungicida Daconil® a

una dosis de  $1 \text{ L ha}^{-1}$  para el control de enfermedades asociadas a *Phytophthora capsici* y *Phytophthora* spp. La cosecha se efectuó de manera manual en tres jornadas, iniciándose a los 110 días después del trasplante, cuando los frutos alcanzaron la madurez comercial.

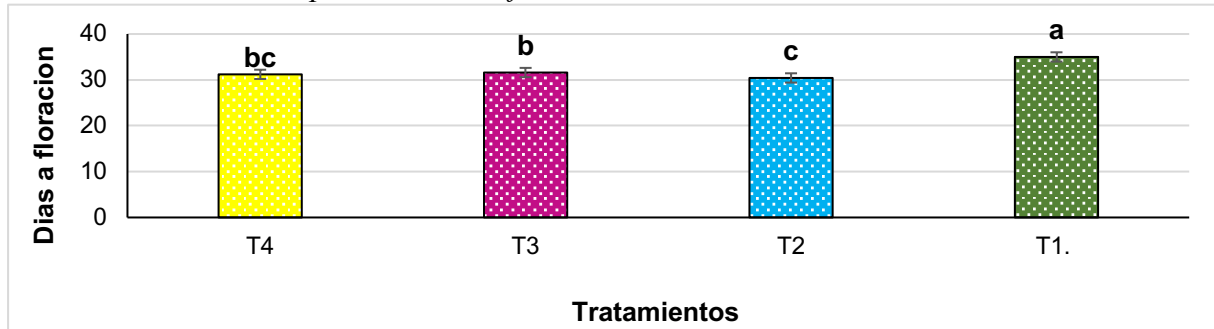
Las variables evaluadas incluyeron días a la floración, altura de planta, diámetro de tallo, número de frutos por planta, frutos sanos y dañados, peso, diámetro y longitud de fruto, rendimiento del cultivo, así como biomasa fresca y seca de hojas, tallo y raíz. Las mediciones se realizaron utilizando cinta métrica, calibrador tipo Vernier y balanza digital, según la variable evaluada. El rendimiento se calculó a partir del peso total de los frutos cosechados y se expresó en  $\text{kg ha}^{-1}$ . Los datos fueron sometidos a verificación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, seguido de un análisis de varianza (ANOVA); cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad. El análisis estadístico se realizó en el software Infostat, y adicionalmente se efectuó un análisis económico para determinar el costo total de producción, el ingreso bruto y la relación beneficio/costo (B/C) de cada tratamiento.

## Resultados

### Días a la floración

Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a los días requeridos para alcanzar la floración. El tratamiento T2 (nanopartículas de silicio  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) presentó el menor valor con 30,40 días, seguido por T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) con 31,20 días y T3 (nanopartículas de silicio  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) con 31,60 días. En contraste, el tratamiento T1 (control con agua) registró el mayor número de días con 35,00. El coeficiente de variación fue de 1,42 % (Figura 1).

**Figura 1**  
Promedio de días a la aparición de las flores

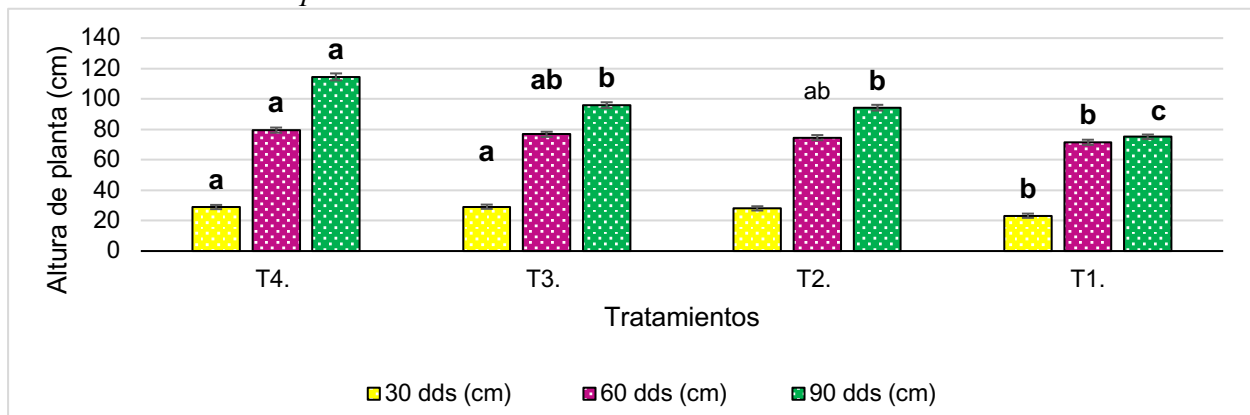


*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

**Altura de planta (cm)**

En la evaluación de la altura de planta a los 30, 60 y 90 días después de la siembra (dds), se observaron diferencias entre tratamientos. A los 30 dds, el tratamiento T3 (nanopartículas de silicio 500 mg·L<sup>-1</sup>) presentó el mayor promedio con 29,15 cm, mientras que T1 (control con agua) registró el menor valor con 23,22 cm. A los 60 dds, el mayor crecimiento fue alcanzado por T4 (nanopartículas de silicio 1000 mg·L<sup>-1</sup>) con 79,50 cm, seguido de T3 y T2, siendo T1 nuevamente el de menor altura con 71,50 cm. Finalmente, a los 90 dds, T4 mantuvo el mayor promedio con 114,50 cm, en contraste con T1, que mostró la menor altura con 75,10 cm. Los coeficientes de variación fueron de 6,66 %, 4,32 % y 2,38 % respectivamente (Figura 2).

**Figura 2**  
Promedio de altura de planta de los tratamientos



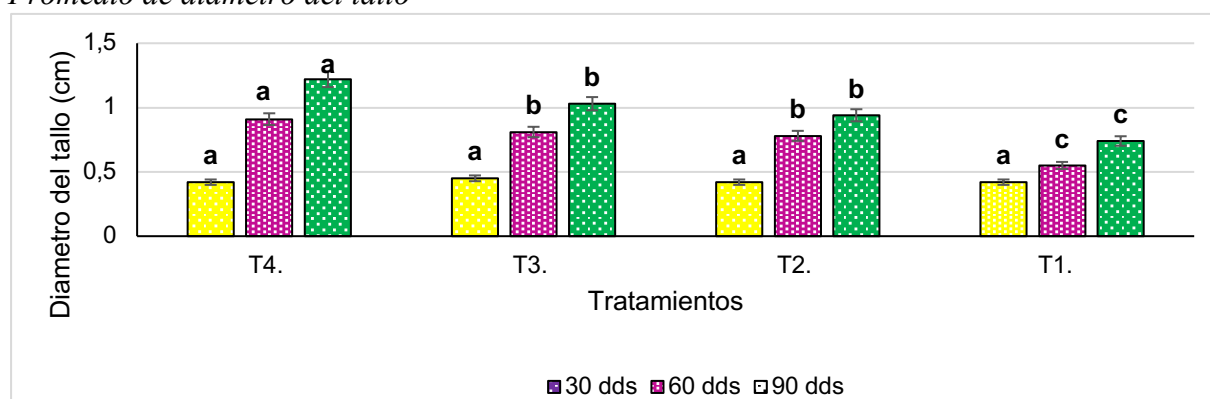
*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

### Diámetro del tallo (cm)

En la evaluación del diámetro del tallo a los 30, 60 y 90 días después de la siembra (dds), se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. A los 30 dds, los tratamientos T1 (control con agua), T2 (nanopartículas de silicio  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) presentaron valores similares de 0,42 cm, mientras que el mayor diámetro fue registrado por T3 (nanopartículas de silicio  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) con 0,45 cm. A los 60 dds, el tratamiento T4 alcanzó el mayor valor con 0,91 cm, y el menor promedio fue observado en T1 con 0,55 cm. Finalmente, a los 90 dds, T4 mantuvo la mayor expresión con 1,22 cm, mientras que T1 continuó registrando el menor valor con 0,74 cm. Los coeficientes de variación fueron 7,04%, 5% y 6,38% respectivamente (Figura 3).

### Figura 3

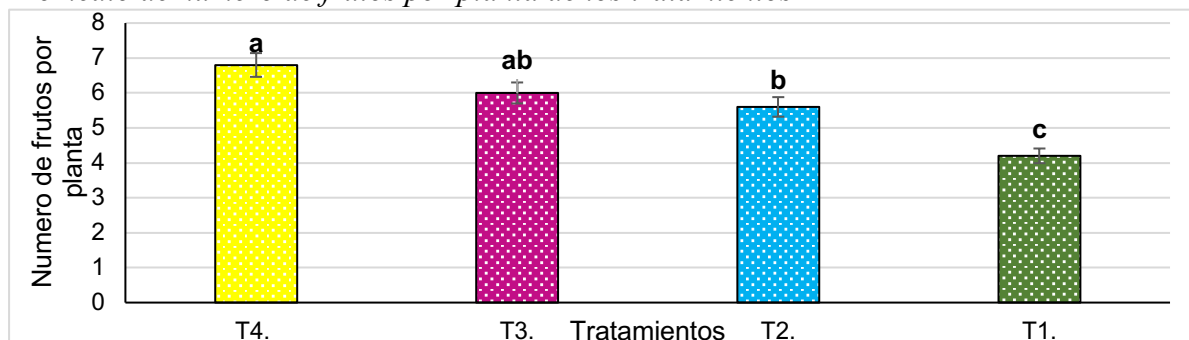
Promedio de diámetro del tallo



*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; T3: Nanopartículas de Silicio  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; T4: Nanopartículas de Silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Autores, 2026).

### Número de frutos por planta

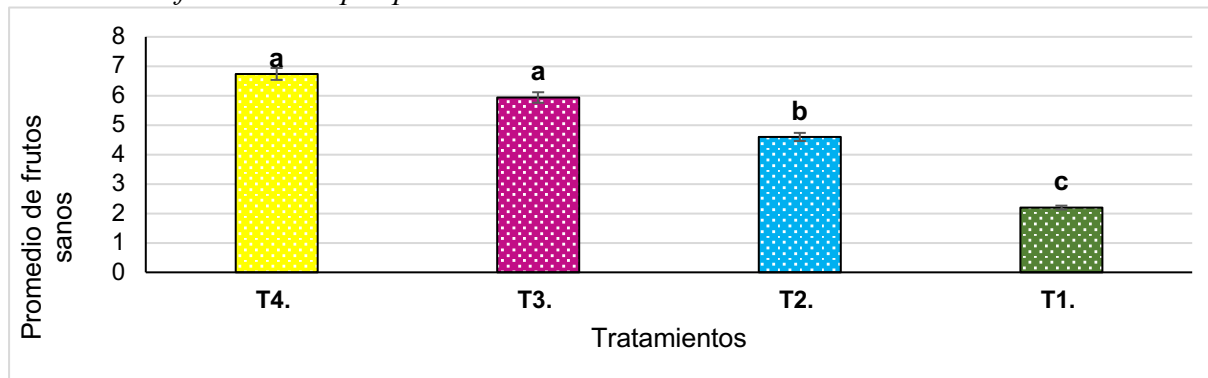
En la evaluación del número de frutos por planta se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) obtuvo el mayor promedio con 6,80 frutos por planta, seguido por T3 (nanopartículas de silicio  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) con 6 frutos. El menor valor fue registrado por el tratamiento T1 (control con agua), con un promedio de 4,20 frutos por planta. El coeficiente de variación fue de 9.56 % (Figura 4).

**Figura 4***Promedio de numero de frutos por planta de los tratamientos*

*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

### Frutos sanos

De acuerdo con el análisis estadístico, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en relación con el número de frutos sanos por planta. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio 1000 mg·L<sup>-1</sup>) alcanzó el mayor promedio con 7 frutos por planta, seguido de T3 (nanopartículas de silicio 500 mg·L<sup>-1</sup>) con 6 frutos. El menor valor fue registrado por T1 (control con agua), con 2 frutos sanos por planta. El coeficiente de variación fue de 10,72 % (Figura 5).

**Figura 5***Promedio de frutos sanos por planta de los tratamientos*

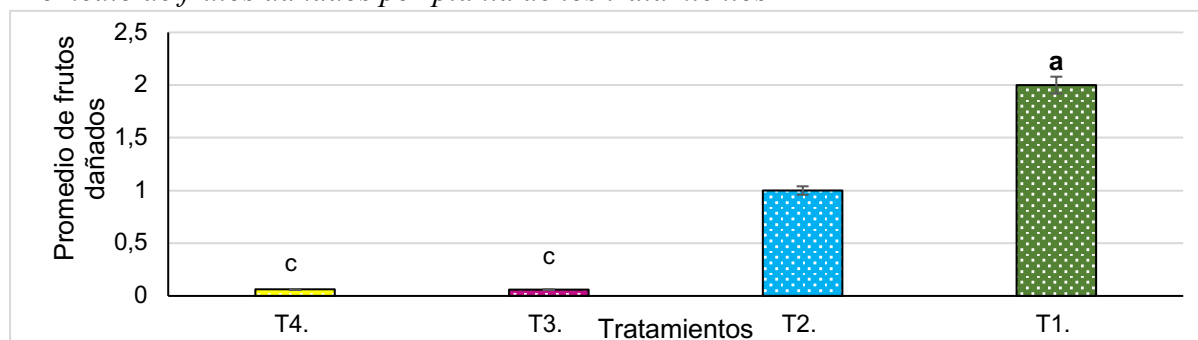
*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

## Frutos dañados

Respecto a la variable frutos dañados por planta, los análisis estadísticos mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T1 (control con agua) presentó el mayor promedio con 2,00 frutos dañados por planta, seguido de T2 (nanopartículas de silicio  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) con 1,00 fruto. Los tratamientos T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) y T3 (nanopartículas de silicio  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) registraron los valores más bajos, ambos con 0,06 frutos dañados por planta, siendo estadísticamente inferiores al resto de tratamientos. El coeficiente de variación fue de 9,93 % (Figura 6).

### Figura 6

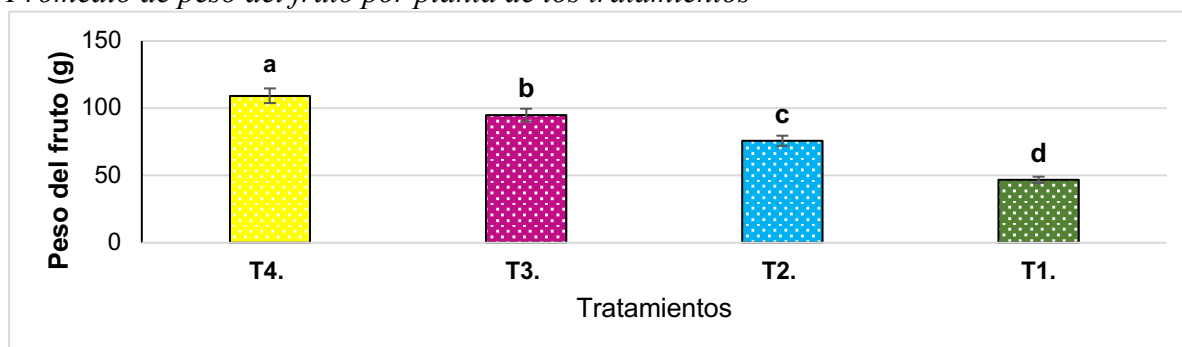
Promedio de frutos dañados por planta de los tratamientos



*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; T3: Nanopartículas de Silicio  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; T4: Nanopartículas de Silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (Autores, 2026).

### Peso del fruto (g)

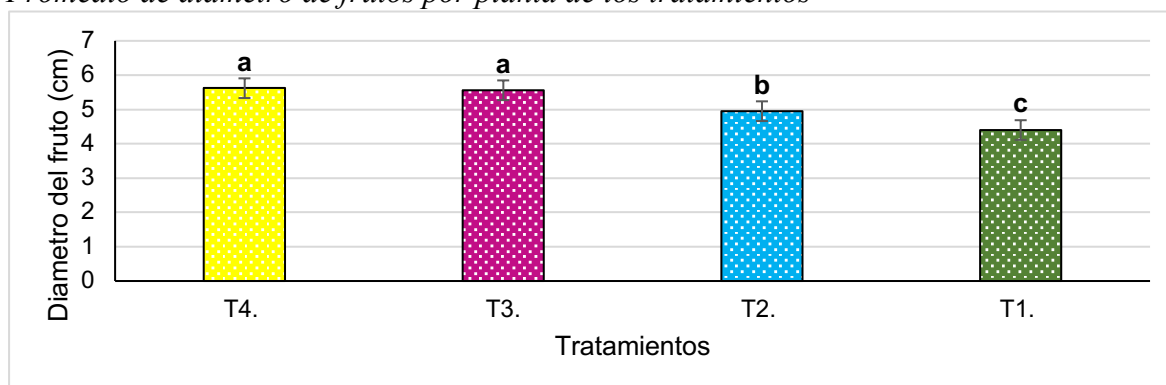
Para la variable peso del fruto, los análisis estadísticos mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) obtuvo el mayor promedio con 109,30 g, seguido de T3 (nanopartículas de silicio  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) con 94,90 g. El tratamiento T2 (nanopartículas de silicio  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) alcanzó un promedio de 75,80 g, mientras que el T1 (control con agua) presentó el menor valor con 46,80 g. El coeficiente de variación fue de 2,23 % (Figura 7).

**Figura 7***Promedio de peso del fruto por planta de los tratamientos*

*Nota:* Leyenda: Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio  $250 \text{ mg L}^{-1}$ ; T3: Nanopartículas de Silicio  $500 \text{ mg L}^{-1}$ ; T4: Nanopartículas de Silicio  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  (Autores, 2026).

### **Diámetro de los frutos (cm)**

Respecto al diámetro del fruto, los análisis estadísticos revelaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) presentó el mayor promedio con  $5,62 \text{ cm}$ , seguido por T3 (nanopartículas de silicio  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) con  $5,56 \text{ cm}$ . Por su parte, T2 (nanopartículas de silicio  $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) y T1 (control con agua) mostraron los menores valores, con promedios de  $4,95 \text{ cm}$  y  $4,40 \text{ cm}$ , respectivamente. El coeficiente de variación fue de  $4,18 \%$  (Figura 8).

**Figura 8***Promedio de diámetro de frutos por planta de los tratamientos*

*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio  $250 \text{ mg L}^{-1}$ ; T3: Nanopartículas de Silicio  $500 \text{ mg L}^{-1}$ ; T4: Nanopartículas de Silicio  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  (Autores, 2026).

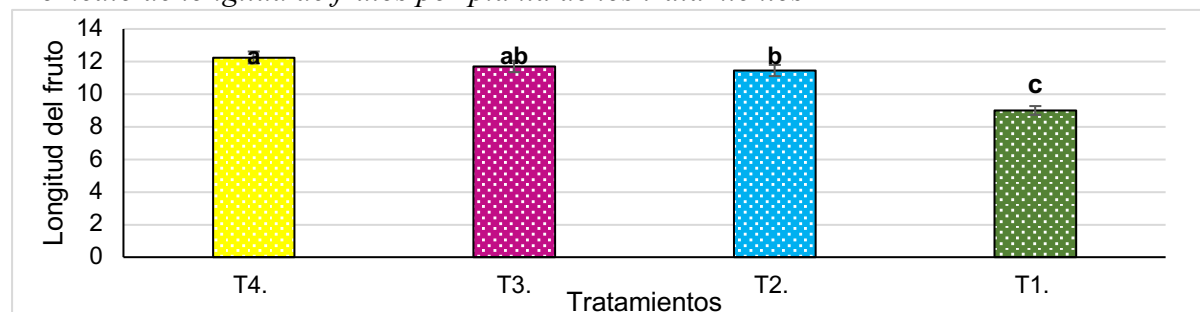
### **Longitud de los frutos (cm)**

Respecto a la variable longitud del fruto, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) registró la mayor

longitud con un promedio de 12,25 cm, mientras que el T1 (control con agua) presentó el valor más bajo con 9,00 cm. El coeficiente de variación fue de 3,61 % (Figura 9).

**Figura 9**

*Promedio de longitud de frutos por planta de los tratamientos*



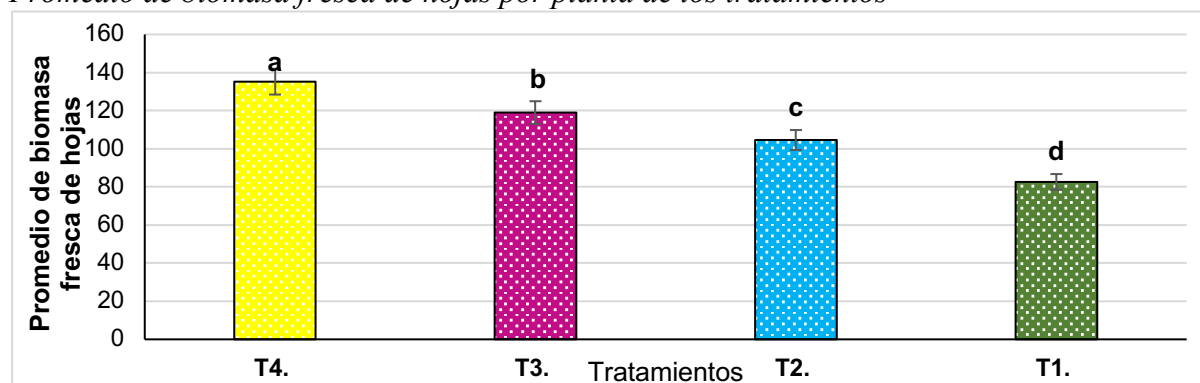
*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

**Biomasa fresca de hojas (g)**

En la variable biomasa fresca de hojas, los análisis estadísticos mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio 1000 mg·L<sup>-1</sup>) alcanzó el mayor promedio con 135,20 g, mientras que T1 (control con agua) registró el valor más bajo con 82,60 g. El coeficiente de variación fue de 3,41 % (Figura 10).

**Figura 10.**

*Promedio de biomasa fresca de hojas por planta de los tratamientos*



*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

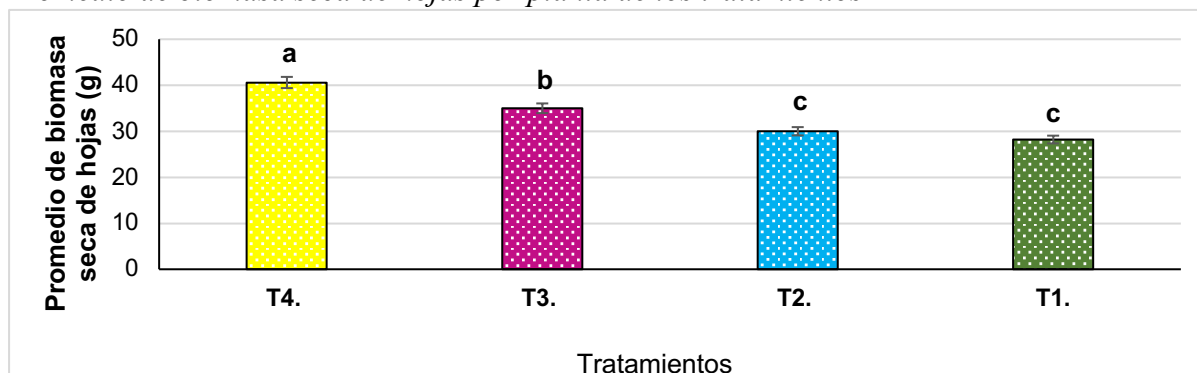
**Biomasa seca de hojas (g)**

Respecto a la biomasa seca de hojas, los análisis estadísticos revelaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio 1000 mg·L<sup>-1</sup>)

obtuvo el mayor promedio con 40,60 g, mientras que el tratamiento T1 (control con agua) registró el valor más bajo con 28,20 g. El coeficiente de variación fue de 3,48 % (Figura 11).

**Figura 11.**

*Promedio de biomasa seca de hojas por planta de los tratamientos*



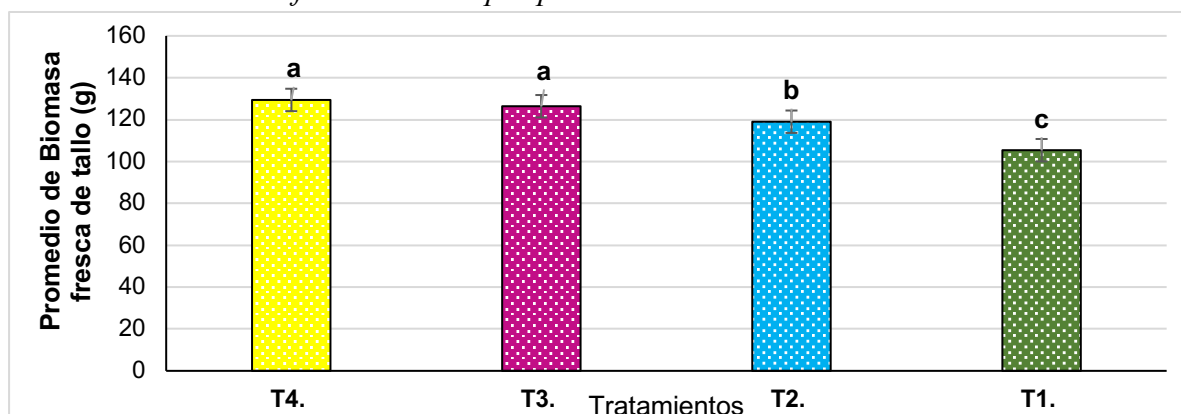
*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

**Biomasa fresca tallo (g)**

En relación con la biomasa fresca del tallo, los resultados estadísticos evidenciaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio 1000 mg·L<sup>-1</sup>) alcanzó el mayor promedio con 129,40 g, seguido por T3 (nanopartículas de silicio 500 mg·L<sup>-1</sup>) con 126,40 g. El tratamiento T2 (nanopartículas de silicio 250 mg·L<sup>-1</sup>) registró un valor intermedio de 119,00 g, mientras que T1 (control con agua) obtuvo el promedio más bajo con 105,40 g. El coeficiente de variación fue de 3,78 % (Figura 12).

**Figura 12**

*Promedio de biomasa fresca de tallo por planta de los tratamientos*



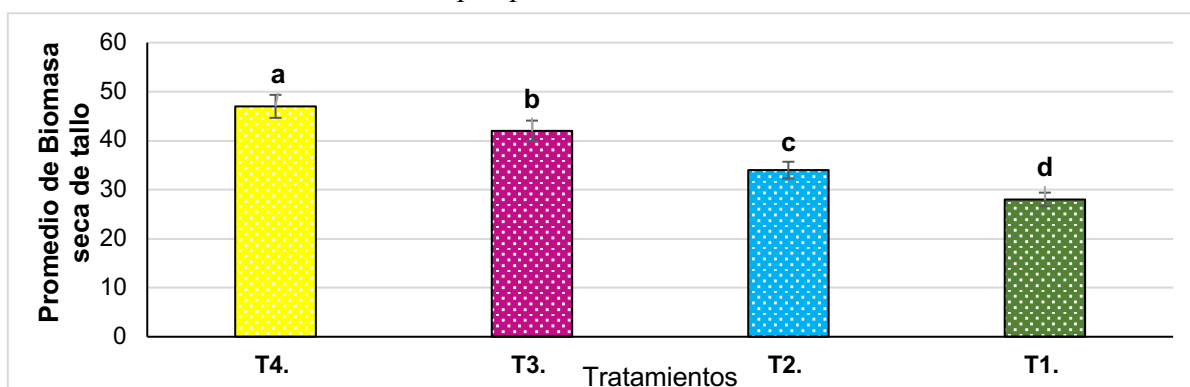
*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

### Biomasa seca tallo (g)

En la evaluación de la biomasa seca del tallo, el análisis estadístico reveló diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) presentó el mayor promedio con 47,00 g, seguido por T3 (nanopartículas de silicio  $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) con 42,00 g. El tratamiento T2 (nanopartículas de silicio  $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) alcanzó un valor intermedio de 34,00 g, mientras que el T1 (control con agua) registró el promedio más bajo con 28,00 g. El coeficiente de variación fue de 3,22 % (Figura 13).

#### Figura 13

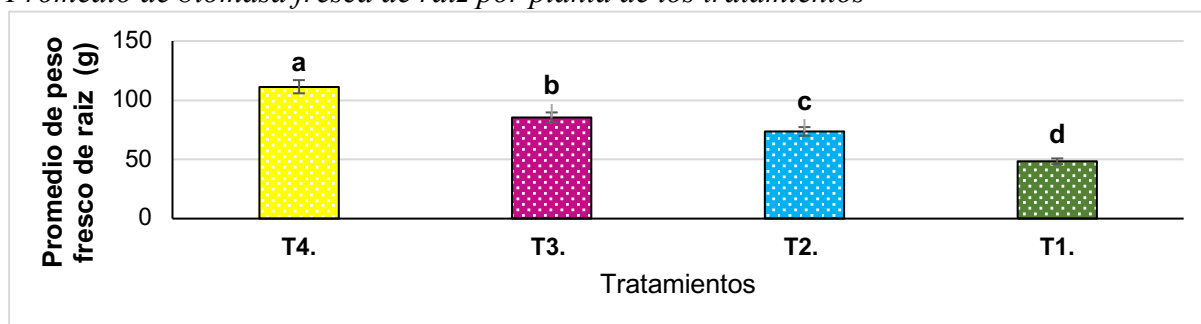
*Promedio de biomasa seca de tallo por planta de los tratamientos*



*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio  $250 \text{ mg L}^{-1}$ ; T3: Nanopartículas de Silicio  $500 \text{ mg L}^{-1}$ ; T4: Nanopartículas de Silicio  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  (Autores, 2026).

### Biomasa fresca de raíz (g)

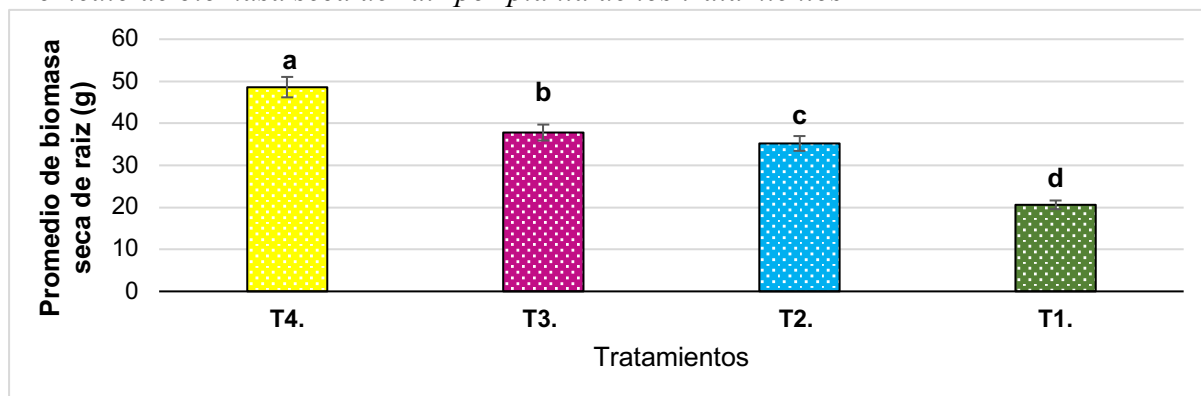
En la variable biomasa fresca de raíz, se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) presentó el mayor valor con 111,40 g, seguido por T3 ( $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) con 85,40 g. El tratamiento T2 ( $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) alcanzó un promedio de 73,60 g, mientras que el control T1 (agua) registró el menor valor con 48,40 g. El coeficiente de variación fue de 2,32 % (Figura 14).

**Figura 14***Promedio de biomasa fresca de raíz por planta de los tratamientos*

*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

### Biomasa seca de raíz

Respecto a la biomasa seca de raíz, los análisis estadísticos revelaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio 1000 mg·L<sup>-1</sup>) obtuvo el mayor promedio con 48,60 g, seguido de T3 (500 mg·L<sup>-1</sup>) con 37,80 g. El tratamiento T2 (250 mg·L<sup>-1</sup>) alcanzó 35,20 g, mientras que el control T1 (agua) registró el valor más bajo con 20,60 g. El coeficiente de variación fue de 3,75 % (Figura 15).

**Figura 15***Promedio de biomasa seca de raíz por planta de los tratamientos*

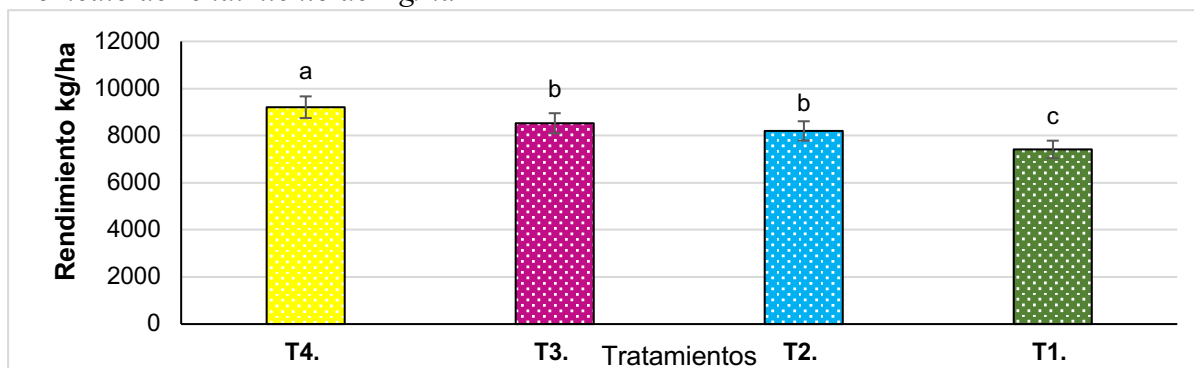
*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a  $p < 0.05$  (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

### Rendimiento (Kg/ha-1)

Respecto a la variable del rendimiento por hectárea mostró diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento T4 (Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup>) obtuvo el mayor promedio con 9205,40 kg/ha, destacándose como el tratamiento más eficiente en

términos de rendimiento. Le siguió el tratamiento T3 (Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>), con un promedio de 8525,20 kg/ha, el tratamiento T1 Control (Agua) presentó el menor de los promedios con 7414,80 kg/ha, siendo significativamente inferior a los demás tratamientos evaluados. El coeficiente de varianza fue de 3,38 % (Figura 16).

**Figura 16**  
Promedio de rendimiento de Kg/ha



Nota: Letras diferentes indican diferencias significativas entre los promedios de cada tratamiento a p<0.05 (prueba de Tukey). T1: Control (agua); T2: Nanopartículas de Silicio 250 mg L<sup>-1</sup>; T3: Nanopartículas de Silicio 500 mg L<sup>-1</sup>; T4: Nanopartículas de Silicio 1000 mg L<sup>-1</sup> (Autores, 2026).

**Análisis económico**

El análisis económico del cultivo de pimiento bajo la aplicación de nanopartículas de silicio evidenció diferencias relevantes entre los tratamientos. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio 1000 mg·L<sup>-1</sup>) alcanzó el mayor rendimiento con 9205,4 kg·ha<sup>-1</sup>, acompañado de la relación beneficio/costo más alto (2,13) y una rentabilidad del 112,92 %, reflejando una mayor eficiencia económica. En contraste, el tratamiento T1 (control con agua) presentó los valores más bajos, con un rendimiento de 7414,8 kg·ha<sup>-1</sup>, una relación beneficio/costo de 1,78 y una rentabilidad de 77,91 % (Tabla 1).

**Tabla 1**  
Análisis económico de los tratamientos

Tratamientos	Rendimiento (kg/ha)	Ingreso bruto (\$)	Costo/tratamiento (\$)	Beneficio neto (\$)	Relación beneficio / costo	Rentabilidad (%)
T1. Control	7414,8	3336,66	1875,5	1461,16	1,78	77,91
T2. 250 mg. L	8199,4	3689,73	1895,50	1794,23	1,95	94,66
T3. 500 mg. L	8525,2	3836,34	1905,50	1930,84	2,01	101,33
T4. 1000 mg. L	9205,4	4142,43	1945,50	2196,93	2,13	112,92

Nota: (Autores, 2026).

## Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio indican que la aplicación de nanopartículas de Silicio (Si-NPs) generó un impacto positivo en varias variables de crecimiento y rendimiento del cultivo. La mejora observada en la altura de las plantas, biomasa, área foliar y número de frutos puede estar relacionada con la función fisiológica del Silicio como elemento benéfico en las plantas, particularmente en la regulación del estrés abiótico y biótico concordando con lo reportado (Cázarez-Flores et al., 2022). Se ha demostrado que el Silicio fortalece las paredes celulares, incrementa la eficiencia fotosintética y mejora la resistencia a condiciones adversas como sequía, salinidad y ataque de patógenos coincidiendo con los hallazgos de Constantinescu-Aruxandei et al. (2020). La adición de Si-NPs en los tratamientos pudo haber contribuido a una mayor estabilidad estructural y funcional de los tejidos vegetales, favoreciendo un crecimiento más vigoroso y un desarrollo óptimo del cultivo (Jiménez, 2022).

El incremento en la altura de las plantas tratadas con Si-NPs sugiere que el Silicio actuó como regulador del crecimiento vegetal, promoviendo una mayor división celular y elongación en los tejidos meristemáticos, concordando con lo reportado por Santos et al. (2021). Este efecto puede estar asociado a la influencia del Silicio sobre la regulación hormonal y su papel en el fortalecimiento de la pared celular. Se ha documentado que el Silicio mejora la actividad de enzimas antioxidantes como la peroxidasa y superóxido dismutasa, las cuales reducen el estrés oxidativo causado por especies reactivas de oxígeno (ROS), protegiendo la integridad de las células en etapas críticas del desarrollo (Mejía et al., 2022).

De forma similar, Araújo et al. (2022) evaluaron el efecto de la aplicación de Silicio en maíz bajo diferentes niveles de déficit hídrico, y encontraron interacciones significativas en variables como la masa fresca y seca de la parte aérea y la productividad total. Aunque el presente estudio se realizó bajo condiciones normales de riego, los resultados obtenidos reflejan un patrón de respuesta fisiológica positivo similar, lo que sugiere que el efecto del Silicio no

solo se manifiesta bajo condiciones de estrés, sino también en ambientes sin limitaciones aparentes.

Otro aspecto relevante es la influencia del Silicio en la eficiencia en el uso del agua, un factor crucial para el crecimiento vegetal (Santos et al., 2020). Estos resultados fueron corroborados por Cazárez-Flores et al. (2023), que las dosis de Silicio en estudio fueron eficaces para aumentar diámetro de tallo, número de hojas, área foliar, índice de verdor y acidez titulable. De manera similar, en el presente estudio se observaron mejoras en dichas variables, especialmente en el área foliar y el grosor del tallo, lo que refuerza el efecto positivo del Silicio sobre el desarrollo vegetativo.

En cuanto al rendimiento del cultivo, el aumento en el número de frutos, longitud del fruto, peso y rendimiento total en los tratamientos con Si-NPs podría estar relacionado con la mayor eficiencia en la translocación de fotoasimilados hacia los órganos de cosecha (Ibarra Anchundia et al., 2022). Se ha documentado que el Silicio mejora la actividad de enzimas relacionadas con la síntesis de carbohidratos y su transporte hacia las estructuras de almacenamiento, lo que podría explicar el mayor peso y tamaño de los frutos en este estudio (Mesquita et al., 2024). Por lo cual, el Silicio puede influir en la síntesis de fitohormonas como auxinas y giberelinas, las cuales están involucradas en la regulación del desarrollo del fruto y en la formación de estructuras reproductivas, promoviendo así un mayor rendimiento en comparación con los tratamientos sin aplicación de Si-NPs (Würz et al. 2020). En el presente estudio, la aplicación de Si-NPs a una dosis de 1000 mg L<sup>-1</sup> permitió alcanzar los valores más altos de rendimiento total y número de frutos, lo que reafirma la eficacia de este nanomaterial en el desempeño productivo del cultivo. De igual forma, Caron y Markusen (2016) reportaron que la presencia de Silicio favoreció el desarrollo vegetativo y aumentó el número de frutos por planta.

La influencia en el crecimiento y rendimiento del Silicio también ha sido reportada como un factor clave en la resistencia a plagas y enfermedades. Su acumulación en las paredes celulares de hojas y tallos crea una barrera física que dificulta la penetración de patógenos y la alimentación de insectos herbívoros (Cázarez-Flores et al., 2022). Esto podría haber contribuido a una menor incidencia de daños en los tratamientos con Si-NPs, permitiendo un desarrollo más uniforme en los frutos. Concordando con lo reportado con Padrón-Vázquez et al. (2023) y Malacara-Herrera et al. (2023) en pepino, la aplicación de Si-NPs disminuyó la severidad de infecciones por hongos fitopatógenos como *Fusarium* y *Pythium*, lo que refuerza la hipótesis de que el Silicio actúa como un agente protector contra enfermedades en las plantas.

Los resultados obtenidos en el trabajo de investigación se evidencian el incremento de biomasa fresca y seca de las plantas tratadas con nanopartículas de Silicio con una dosis de  $1000 \text{ mg L}^{-1}$  presento los valores más altos, estos resultados concuerdan con estudios previos que destacan la capacidad del Silicio para mejorar la absorción de nutrientes en el estudio de González- Moscoso et al. (2021) observaron que la aplicación de nanopartículas de Silicio mejoro la absorción de macronutrientes, promoviendo mayor producción de biomasa tanto en raíces como en la parte aérea (Avellaneda Vázquez, & Herrera-Eguez, 2024).

Es importante considerar la posible interacción entre el Silicio y otros nutrientes esenciales en la planta. Se ha sugerido que la aplicación de Si-NPs puede mejorar la absorción y asimilación de macronutrientes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), debido a su efecto en la activación de transportadores específicos en las raíces (Cassel et al., 2021a). Esto podría influir en la mejora del crecimiento y rendimiento observados en este estudio, ya que una mayor disponibilidad de nutrientes favorece una mayor producción de biomasa y una mejor calidad de los frutos. En estudios realizados en arroz, se ha encontrado que la aplicación de Silicio incrementa la concentración de nitrógeno en las hojas (Padilla-Castro et al., 2022) y

mejora la eficiencia en la fotosíntesis (Pereira et al., 2023), lo que se traduce en un mayor rendimiento del cultivo.

Se ha reportado que el Silicio estimula la producción de compuestos secundarios como flavonoides y fenoles, los cuales tienen propiedades antioxidantes y desempeñan un papel crucial en la defensa contra el estrés oxidativo (Cassel et al., 2021b). La mayor acumulación de estos compuestos en las plantas tratadas con Si-NPs podría haber mejorado su resistencia a condiciones ambientales adversas y contribuido a un desarrollo más saludable del cultivo (Ranjan et al., 2021). Concordando con los reportado por Antúnez-Ocampo et al. (2023), que encontró que la aplicación de silicio en maíz favoreció el tamaño de la mazorca y rendimiento de grano.

Es importante destacar que los efectos del Silicio pueden variar dependiendo de factores como la dosis aplicada, el tipo de suelo y las condiciones ambientales (Anggria et al., 2020). Han reportado que aplicaciones excesivas de Si-NPs pueden generar toxicidad en ciertos cultivos, afectando la absorción de otros nutrientes y alterando el equilibrio osmótico de las células (Zellner & Datnoff, 2020). Es necesario seguir investigando para determinar las dosis óptimas y evaluar los posibles efectos secundarios del uso de Si-NPs en diferentes sistemas agrícolas. Los resultados obtenidos en este estudio respaldan la hipótesis de que las nanopartículas de silicio pueden mejorar significativamente el crecimiento y rendimiento del cultivo a través de múltiples mecanismos fisiológicos y bioquímicos.

## Conclusión

La aplicación de nanopartículas de silicio influyó significativamente sobre las variables agronómicas evaluadas. El tratamiento T4 (nanopartículas de silicio  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) promovió un mayor desarrollo en altura de planta, diámetro del tallo y acumulación de biomasa fresca y

seca en hojas, tallos y raíces, también redujo el número de días a la floración respecto al control, indicando un efecto positivo sobre el vigor y la precocidad del cultivo.

En términos de rendimiento y calidad del fruto, el tratamiento T4 fue el más destacado, presentando un mayor número de frutos por planta, mejor peso individual, mayor proporción de frutos sanos y superioridad en longitud y diámetro de los frutos. El tratamiento T1 (control con agua) presentó los resultados más bajos en la mayoría de estas variables, mientras que T3 (500 mg·L<sup>-1</sup>) mostró efectos intermedios, confirmando que la respuesta es dependiente de las dosis de nanopartículas aplicados al cultivo.

El análisis económico determinó que el tratamiento T4 fue el más rentable, al obtener el mayor rendimiento por hectárea y la mejor relación beneficio/costo. Esto demuestra que el uso de nanopartículas de silicio, especialmente a dosis de 1000 mg·L<sup>-1</sup>, representa una estrategia efectiva para incrementar la rentabilidad del cultivo de pimiento en condiciones de invernadero frente al control sin fertilización con nanopartículas.

## Referencias bibliográficas

- Anggria, L., Husnain, H., & Masunaga, T. (2020). The controlling factors of silicon solubility in soil solution. *Agric*, 32(2), 83–94. <https://doi.org/10.24246/agric.2020.v32.i2.p83-94>
- Antúnez-Ocampo, O. M., Sabino-López, J. E., Hernández Galeno, C. del Á., & Espinosa-Rodríguez, M. (2023). Rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en respuesta a la fertilización con nitrógeno, fósforo y silicio al suelo. *REVISTA Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1682>
- Avellaneda Vázquez, J. P., & Herrera-Eguez, F. E. (2024). *Dosis de silicio como nueva estrategia para el control de la mancha marrón (Bipolaris oryzae) en arroz (Oryza sativa L.)*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.1.81>
- Cassel, J. L., Gysi, T., Rother, G. M., Pimenta, B. D., Ludwig, R. L., & Santos, D. B. dos. (2021b). Benefícios da aplicação de silício em plantas / Benefits of the application of silicon in plants. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(4). <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n4-140>
- Cazárez-Flores, L. L., Angulo-Castro, A., Vega-Gutiérrez, T. A., Ayala-Tafoya, F., & Aguilar-Quinonez, J. A. (2023). Producción de tomate en respuesta a dosis de silicio. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(3). <https://doi.org/10.19136/era.a10n3.3851>

- Cázar-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. de J., Ayala-Tafoya, F., Díaz-Valdés, T., Yáñez-Juárez, M. G., & López-Orona, C. A. (2022). Silicio y cloro en el crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de pepino y tomate. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.994>
- Christian, M. M., Shimelis, H., Laing, M. D., Tsilo, T. J., & Mathew, I. (2022). Breeding for silicon-use efficiency, protein content and drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.): a review. In *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science* (Vol. 72, Number 1). <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1984564>
- Constantinescu-Aruxandei, D., Lupu, C., & Oancea, F. (2020). Siliceous natural nanomaterials as biorationals—plant protectants and plant health strengtheners. *Agronomy*, 10(11), 1791. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111791>
- Esmeraldas, V. A. C., Rodríguez, J. L. R., Buñay, T. C. G., & Murillo, R. A. L. (2021). Experiencias productivas con pimiento (*Capsicum annuum* L.) con abonos orgánicos en el subtrópico del Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(4), 4311–4321. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i4.622](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.622)
- Flores-Hernández, E. A., Lira-Saldivar, R. H., Ruiz-Torres, N. A., García-López, J. I., Moreno-Reséndez, A., Rodríguez-Dimas, N., Preciado-Rangel, P., & Mendoza-Retana, S. S. (2021). Síntesis de nanopartículas de hidroxapatita y su efecto en plántulas de *Raphanus sativus*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(1). <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2747>
- Franco Ruiz, A., Veliz Prado, K., Solís Bowen, L., & Celi Soto, A. (2021). Identificación de la entomofauna presente en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en el sector Lodana del cantón Santa Ana, Ecuador. *Manglar*, 18(4), 397–402. <https://erp.untumbes.edu.pe/revistas/index.php/manglar/article/view/280/409>
- Gabriel Ortega, J., Erazo Cajape, E., Vera Velázquez, R., Narváez Campana, W., & Castro Piguave, C. (2022). Selección de tres híbridos de pimiento (*Capsicum annuum* L.) Para puerto la boca, ecuador. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria. ISSN 2602-8166*, 6(2). <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v6.n2.2022.628>
- Galindo-Guzmán, A. P., Fortis-Hernández, M., De La Rosa-Reta, C. V., Zermeño-González, H., & Galindo-Guzmán, M. (2022). Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (28). <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284>
- Ibarra Anchundia, D. C., Tapia González, D. R., Vaca Pazmiño, E. P., Guamán Guamán, R. N., Ulloa Cortázar, S. M., & Villavicencio Abril, Á. F. (2022). Evaluación de diferentes tipos de controles de roya (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) y *Pestalotiopsis* (*Pestalotia* sp.), en el cultivo de la fruta milagrosa (*Synsepalum dulcificum* ADC). *Siembra*, 9(2). <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i2.4007>
- Jiménez, A. (2022). Efecto del silicio en el cultivo del pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones controladas. [Tesis de grado]. *Universidad Técnica Estatal De Quevedo*, (8.5.2017). <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6932>
- Klotz, M., Schaller, J., Kurze, S., & Engelbrecht, B. M. J. (2021). Variation of foliar silicon concentrations in temperate forbs: effects of soil silicon, phylogeny and habitat. *Oecologia*, 196(4), 977–987. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-04978-9>

- Lata-Tenesaca, L. F., Oliveira, M. J. B., Barros, A. V., Picanço, B. B. M., & Rodrigues, F. Á. (2024). Physiological and Biochemical Aspects of Silicon-Mediated Resistance in Maize against Maydis Leaf Blight. *Plants*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/plants13040531>
- Malacara-Herrera, I. del R., Ochoa-Fuentes, Y. M., Cerna-Chávez, E., Velázquez-Guerrero, J. J., Orozco-Plancarte, A., Hernández-Juárez, A., & Aguirre-Uribe, L. A. (2023). Manejo in vitro de *Fusarium acuminatum* con extractos vegetales adicionados con nanopartículas de óxido de silicio y zinc. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (88). <https://doi.org/10.33064/iycuaa2023883638>
- Mesquita, E. F. de, Mesquita, F. de O., Sousa, C. da S., Diniz, J. P. C., Queiroz, L. L. G. de, Maia, D. D., Targino, F. N., Jales, D. V. D., Brito Neto, J. F. de, & Rocha, J. L. A. (2024). Silício e adubação orgânica sobre os atributos físico-químicos de frutos de maracujá-amarelo no semiárido Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(1). <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p100-116>
- Padilla-Castro, C. F., Tomassini-Vidal, L. R., & Heros-Aguilar, E. C. (2022). Tres fuentes de silicio en la producción de biomasa del arroz (*Oryza sativa* L.) bajo condiciones controladas. *Peruvian Journal of Agronomy*, 6(1). <https://doi.org/10.21704/pja.v6i1.1862>
- Padrón-Vázquez, V., González-Rodríguez, V., Mireles-Arriaga, A. I., Mejía-Benavides, J. E., & Díaz-Cervantes, E. (2023). Nanomateriales transportadores de capsinoides como alternativa para inhibir *Fusarium oxysporum*. *Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1). <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.119>
- Pambudi, A., Maryanto, B. A., Effendi, Y., Sudirman, L. I., & Miftahudin, M. (2023). Analysis of silicon-induced genes related to defense system in banana. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1271(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1271/1/012098>
- Pereira, D. D., Silva, I. M. da, Souza, M. R. de, Martins, W. S., Cursino, J. P., Freitas, T. D. de, Costa, L. de P. S., Mariano, L. H. C., Wanderley, A. I. F., & Alves, G. G. de S. (2023). Efeito do silício nas características agronômicas da cultura do arroz. <https://doi.org/10.37423/231208488>
- Quispe-Quispe, E., Moreira-Morrillo, A. A., & Garcés-Fiallos, F. R. (2022). Una revisión sobre biocontroladores de *Phytophthora capsici* y su impacto en plantas de *Capsicum*: Una perspectiva desde el exterior al interior de la planta. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 275–289. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.025>
- Ranjan, A., Sinha, R., Bala, M., Pareek, A., Singla-Pareek, S. L., & Singh, A. K. (2021). Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.044>
- Roychoudhury, A. (2020). Silicon-nanoparticles in crop improvement and agriculture. *International Journal on Recent Advancement in Biotechnology & Nanotechnology*, 3(1), 1571–2582. <https://science.eurekajournals.com/index.php/IJRABN/article/view/203/232>
- Sabir, A., Waraich, E. A., Ahmad, M., Hussain, S., Asghar, H. N., Haider, A., Ahmad, Z., & Bibi, S. (2024). Silicon-Mediated Improvement in Maize (*Zea mays* L.) Resilience:

- Unrevealing Morpho-Physiological, Biochemical, and Root Attributes Against Cadmium and Drought Stress. *Silicon*, 16(7). <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02907-y>
- Santos, C. M. G. dos, Trovato, V. W., Matos, A. M. do N., Mar, G. D. do, Capristo, D. P., Silva, J. A. dos S., & Silva, B. N. P. da. (2020). Efeito da aplicação de silício na germinação de sementes de pimenta sob estresse salino. *Research, Society and Development*, 9(8). <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5442>
- Shilpa, Sharma, A. K., Chauhan, M., & Bijalwan, P. (2024). Plant growth promoting rhizobacteria, organic manures, and chemical fertilizers: impact on crop productivity and soil health of capsicum (*Capsicum annuum* L.) in North Western Himalayan region. *Journal of Plant Nutrition*, 47(3). <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2280120>
- Sotomayor Padilla, D. V., Pendolema Jaramillo, W. A., & López Izurieta, M. D. (2025). Evaluación de la interacción entre agentes biocontroladores y abonos orgánicos en el desarrollo y productividad del cultivo de pimiento en dos zonas, Babahoyo y Febres Cordero. *Arandu UTIC*, 12(1). <https://doi.org/10.69639/arandu.v12i1.848>
- Vargas-Ruiz, D. E., Serrano-Díaz, P. N., Hernández-Gómez, G., & Acosta-Torres, L. S. (2022). Tendencias en regeneración periodontal con el uso de nanopartículas: revisión sistemática de la literatura. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30). <https://doi.org/10.22201/ceiach.24485691e.2023.30.69696>
- Vélez-Ruiz, M. C., Meza-Vera, R. J., Abasolo-Pacheco, F., & Álvarez-Romero, P. I. (2022). Uso de extractos botánicos para el control de pulgón (*Myzus persicae*: Aphididae) y mosca blanca (*Bemisia tabaci*: Aleyrodidae) en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum*: Solanaceae), en Ecuador. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1454>
- Würz, D. A., Kowal, A. N., Fagherazzi, A. F., Santos, G. Dos, & Leite, L. (2020). Efeito da aplicação foliar de silício nos aspectos produtivos e de qualidade de frutos de morangueiro. *Revista Eletrônica Científica Da UERGS*, 6(2). <https://doi.org/10.21674/2448-0479.62.144-149>
- Zellner, W., & Datnoff, L. (2020). Silicon as a biostimulant in agriculture. In *Biostimulants for sustainable crop production* (pp. 149–196). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2020.0068.07>