

Nota Técnica

SILICIO PARA MEJORAR LA CALIDAD DE PLÁNTULAS DE MELÓN (*Cucumis melo* L.) Y PEPINO (*Cucumis sativus* L.)

Tomás A. Vega Gutiérrez¹, Moisés G. Yáñez Juárez¹, Martín A. Tirado Ramírez¹, Luz L. Cázares Flores¹, Aurelia Mendoza Gómez² y Antonio González Balcázar¹

RESUMEN

La adición de silicio (Si) representa una vía prometedora ante los desafíos agrícolas, al proveer efectos mejoradores en las plantas sobre sus mecanismos de defensa, crecimiento, fotosíntesis y producción de frutos. Por tal razón, el objetivo de la presente investigación fue conocer la respuesta del melón y el pepino a diferentes dosis de silicio en crecimiento vegetal y calidad de plántulas. Se sembraron semillas de melón harper vr. Palmira F1, y pepino slicer vr. Modan RZ F1 (22-951), en charolas de 60 cavidades llenadas de peat moss (Berger[®]), mantenidas dentro de una cámara de crecimiento con iluminación artificial, en un ambiente luminoso de 305,3 $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ de DFFF (densidad de flujo de fotones fotosintéticos). Se usó un diseño experimental completamente aleatorio y cinco tratamientos: Si en dosis de 0 (testigo), 1, 3, 5 y 7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Metasilicato de sodio[®], $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$). La aplicación de los tratamientos a las plantas crecidas en charolas se realizó a través del riego. Las variables respuesta fueron: altura de planta (AP), área foliar (AF), diámetro de tallo (DT), verdor foliar (VF), biomasa radical seca (BRS), biomasa aérea seca (BAS), biomasa total (BT) de plántulas, índice de esbeltez (IE), relación parte aérea-parte radical (BAS/BRS) e índice de calidad de Dickson (ICD). El silicio en plántulas de melón y pepino, mejoró el crecimiento y algunos parámetros relacionados con la calidad de las plántulas (BRS, BAS, BT e ICD). Hubo mayor expresión del ICD en las plántulas tratadas con la dosis de 1 mg L^{-1} .

Palabras clave adicionales: Biomasa radical, calidad de plántulas, crecimiento, verdor

ABSTRACT

Silicon to improve the quality of melon (*Cucumis melo* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings

The addition of silicon (Si) represents a promising avenue to address agricultural challenges, providing enhancing effects on plant defense mechanisms, growth, photosynthesis, and fruit production. Therefore, the objective of this research was to understand the response of melon and cucumber to different doses of silicon on plant growth and seedling quality. Seeds of the Harper melon variety Palmira F1 and the slicer cucumber variety Modan RZ F1 (22-951) were sown in 60-cell seedling trays filled with peat moss (Berger[®]), maintained inside a growth chamber with artificial lighting, with a light environment of 305,3 $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ of DFFF (photosynthetic photon flux density). A completely randomized experimental design was used, with five treatments: Si at doses of 0 (control), 1, 3, 5, and 7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Sodium metasilicate[®], $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$). Treatments were applied to tray-grown plants through irrigation. Response variables included plant height (PH), leaf area (LA), stem diameter (SD), leaf greenness (LGB), dry root biomass (DRB), dry aerial biomass (AAB), total biomass (TB) of seedlings, slenderness index (SI), shoot-to-root ratio (SRR/RPR), and Dickson quality index (DQI). Silicon in melon and cucumber seedlings improved growth and quality-related parameters (SRR, SBB, TB, and DQI), with a higher DQI level in seedlings treated with a dose of 1 mg L^{-1} .

Additional Keywords: Greenness, growth, root biomass, seedling quality

Editor Asociado: Dra. Marie Tamara González.

INTRODUCCIÓN

El Silicio (Si) es el elemento de mayor abundancia en la corteza terrestre (27,7 %) después del oxígeno (47,7 %); pero debido a su

limitada solubilidad, no está suficientemente disponible para las plantas (Bist *et al.*, 2020). La absorción y translocación del Si es como ácido silícico ($\text{Si}(\text{OH})_4$) en solución acuosa, para después asentarse como fitolito de SiO_2 en el

Recibido: Julio 21, 2025

Aceptado: Noviembre 19, 2025

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-Eldorado km 17.5. Culiacán, Sinaloa, México. e-mail: tomasvega@uas.edu.mx; moisesyj@uas.edu.mx; martin.tirado@uas.edu.mx; luzcazarez@uas.edu.mx (autor de correspondencia); gonzalezantonio@uas.edu.mx

²Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas, Ej. Nuevo León, Mexicali, Baja California, México. e-mail: aurelia.mendoza@uabc.edu.mx

lumen, paredes y espacios intercelulares (Hodson y Evans, 2020).

El Si es un elemento de importancia para las plantas debido a sus propiedades benéficas al depositarse en la cutícula, mejorar la actividad respiratoria e incrementar la firmeza de los frutos (Pavlovic *et al.*, 2021; Vinaykumar *et al.*, 2024). El Si además de disminuir los daños del estrés por sequía y mejorar la actividad fotosintética, puede modificar la expresión de algunos genes relacionados con la fotosíntesis, el sistema de defensa antioxidante, el equilibrio osmótico, la biosíntesis hormonal y de aminoácidos, la señalización, y el metabolismo de carbohidratos y lípidos (Bhardwaj y Kapoor, 2021; Biju *et al.*, 2023). Esto hace que el requerimiento de Si en las plantas varía según su genotipo y condiciones ambientales (Vinaykumar *et al.*, 2024).

Numerosas evidencias indican que la suplementación con elementos beneficiosos para las plantas representa una vía para impulsar la productividad y la resiliencia de los cultivos en medio de condiciones adversas (Wang *et al.*, 2024). La suplementación con Si modula los mecanismos de señalización de fitohormonas como los ácidos abscísico, giberélico, jasmónico y salicílico, así como de brasinoesteroide, etileno, citoquinina y auxinas, mediante la sobreexpresión de los genes que controlan su producción bajo estrés abiótico en las plantas (Khan *et al.*, 2023).

La aplicación de Si en los cultivos puede mejorar el rendimiento, el valor nutritivo y económico, y aumentar el contenido de proteínas; por tanto, la adición de Si en la fertilización es fundamental para la agricultura sostenible (Xu *et al.*, 2024). En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue conocer la respuesta de plántulas de melón y pepino a diferentes dosis de silicio en crecimiento, verdor foliar, acumulación de biomasa seca radical, aérea, total y calidad de plántulas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el Laboratorio de Fisiología y Anatomía Vegetal de la Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, en Culiacán, Sinaloa, México, ubicada en las coordenadas 24° 37' 29" N y 107° 26' 36" O, con altitud de 38,5 msnm.

Se sembraron semillas de melón harper vr.

Palmira F1 y pepino slicer vr. Modan RZ F1 (22-951) en charolas de poliestireno con 60 cavidades. Cada cavidad se rellenó con 200 cm³ de peat moss (Berger[®]) y se colocó una semilla en cada una. Las charolas se mantuvieron dentro de una cámara de crecimiento con iluminación artificial, con un ambiente luminoso de 305,3 µmol·m⁻² s⁻¹ de DFFF (densidad de flujo de fotones fotosintéticos). La temperatura y humedad relativa (registradas con un termohigrómetro CM-DT171, Twilight, México) presentaron medias ± error estándar de 24,5 ± 0,15 °C y 62,5 ± 0,6 %, respectivamente; un nivel de CO₂ de 420 µmol·mol⁻¹ y un fotoperiodo de 12/12 h de luz/obscuridad.

Se realizó la fertilización cuando las plántulas desplegaron la primera hoja verdadera (12 días después de la siembra, dds) con solución Steiner al 25 %, más 5 g·L⁻¹ de quelato Full mix B (Microhow[®]), de acuerdo con las necesidades nutrimentales e hídricas.

Se usó un diseño experimental completamente aleatorio y cinco tratamientos: Si en dosis de 0 (testigo), 1, 3, 5 y 7 mg·L⁻¹ de Si (Metasilicato de sodio[®], Na₂SiO₃·9H₂O). Las aplicaciones de los tratamientos se realizaron a los 12 dds (cinco aplicaciones, cada tercer día) a través de los riegos. El área experimental constó de una charola con 60 plántulas por tratamiento.

Las variables respuesta fueron evaluadas a los 37 días (dds). Fueron seleccionadas 30 plantas al azar por tratamiento, para evaluar: altura de planta (AP), área foliar (AF), diámetro de tallo (DT), verdor foliar (VF), biomasa radical seca (BRS), biomasa aérea seca (BAS), biomasa total (BT) de plántulas, índice de esbeltez (IE), relación parte aérea-parte radical (BAS/BRS) e índice de calidad de Dickson (ICD).

La AP se midió desde la base hasta el ápice de ésta con una cinta métrica (Goldfish[®]); para el AF se midió largo (L) y ancho (W) de hojas con una cinta métrica (Goldfish[®]), los cálculos se determinaron mediante las siguientes fórmulas; en melón, AF= 0,75 (L·W) (Altieri, 1997) y para pepino, AF= 0,851 (L·W) (Blanco y Folegatti, 2003); por su parte, el DT se midió entre los cotiledones y primera hoja verdadera con un vernier (Truper CALDI-6MP[®]), y el VF se determinó en la parte media de una hoja totalmente formada con un medidor de clorofila (Spad-502, Minolta[®]).

Posteriormente (por separado parte aérea y

radical), se determinó BRS, BAS y BT de las plántulas, luego de someterlas a secado durante 72 h en estufa (292, Felisa[®]) a 70 °C. Adicionalmente, con los datos de las variables morfológicas, se determinaron los parámetros de calidad en plántulas: el IE, mediante la metodología propuesta por Schmidt (1980), con la expresión: $IE = \frac{AP(cm)}{DT(mm)}$; la relación parte aérea-parte radical (BAS/BRS), por la división de la biomasa aérea seca entre la biomasa radical seca; y el ICD, (Dickson *et al.*, 1960), con la fórmula:

$$ICD = \frac{BT(g)}{\frac{AP(cm)}{DT(mm)} + \frac{BAS(g)}{BRS(g)}}$$

Los datos de las variables respuesta se evaluaron mediante un análisis de varianza y una

prueba de comparación de medias por el Test de Tukey a un nivel de confianza de 95 %, con el programa estadístico MINITAB[®] 18.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Plántulas de melón. Los resultados de las variables AP, AF, DT y VF se muestran en el Cuadro 1. En AP, las plántulas tratadas con Si en dosis de 7, 5 y 3 mg·L⁻¹ tuvieron incrementos significativos ($p \leq 0,05$) en 2,46, 1,70 y 1,36 cm, respectivamente, con relación al testigo. Las plántulas de melón tratadas con Si no presentaron diferencias estadísticas en AF y DT.

Cuadro 1. Comportamiento del crecimiento y verdor foliar de plántulas de melón (*Cucumis melo* L.) en función al silicio.

Dosis de silicio (mg·L ⁻¹)	AP (cm)	AF (cm ²)	DT (mm)	VF (U. Spad)
0 (testigo)	10,27 ± 1,55 d	22,20 ± 5,18 a	3,57 ± 0,50 a	36,47 ± 2,08 a
1	10,73 ± 1,64 cd	24,13 ± 3,79 a	3,60 ± 0,50 a	33,15 ± 1,93 b
3	11,63 ± 2,30 bc	22,93 ± 5,27 a	3,56 ± 0,50 a	36,32 ± 1,80 a
5	11,97 ± 1,83 ab	22,90 ± 3,63 a	3,76 ± 0,43 a	33,76 ± 1,81 b
7	12,73 ± 1,89 a	23,27 ± 3,42 a	3,57 ± 0,50 a	36,23 ± 2,20 a
CV %	17,75	18,72	13,48	6,87

Valores con la misma letra ± desviación estándar, dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variación. AP; altura de planta, AF; área foliar, DT; diámetro de tallo y VF; verdor foliar.

En VF, las plántulas tratadas con las dosis de 3 y 7 mg·L⁻¹ de Si no presentaron diferencia estadística ($p \leq 0,05$) con respecto al testigo; el resto de los tratamientos mostraron decrementos en 7 y 9 %, con relación al testigo. Estos resultados indican que la aplicación foliar de Si en plántulas de melón generó un efecto no lineal sobre el VF. Esto sugiere que concentraciones intermedias pudieron producir alteraciones fisiológicas temporales vinculadas a la producción de clorofila. En contraste, la concentración de 7 mg·L⁻¹ de Si, activó mecanismos fisiológicos que permitieron mantener el VF en niveles similares al testigo. Los resultados de la presente investigación indican el efecto favorable del metasilicato de sodio sobre la AP, AF y DT en plántulas de melón; hallazgos que concuerdan con los de Kamenidou *et al.* (2010), quienes señalaron que el metasilicato de sodio aplicado a plantas de gerbera (*Gerbera*

híbrida L.), cultivadas en invernadero, mostró un efecto positivo sobre la altura de planta, grosor de tallo, tamaño de flor y momento de floración. También coinciden con los de Enríque *et al.* (2025), quienes demostraron que, en plántulas de tomate vr. Rio Grande dentro de un gradiente de salinidad medio-alto de 25-50 mM, el Si en dosis de 1 y 2 Mm influyó positivamente en la longitud del tallo y la acumulación de biomasa fresca.

El Si en las plantas actúa como un refuerzo estructural al dar vigor a las paredes celulares, contribuyendo a mejorar la resistencia al estrés biótico y abiótico (Llerena *et al.*, 2025). Además, el Si influye en la absorción de ciertos nutrientes esenciales para las plantas, favoreciendo un crecimiento más vigoroso y acelerando la floración (Ahsan *et al.*, 2023).

En el Cuadro 2 se evidencia que el BRS presentó diferencias estadísticas significativas

($p \leq 0,05$). La aplicación de $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de Si generó un valor de 88 %, el cual superó de manera significativa al tratamiento testigo. Por su parte, las demás concentraciones evaluadas de Si promovieron incrementos en el BRS entre 16 % y 28 % en comparación con el testigo; no obstante, dichas variaciones no alcanzaron significancia estadística.

Cuadro 2. Acumulación de biomasa seca de plántulas de melón (*Cucumis melo* L.) en función al silicio.

Dosis de silicio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BRS (g)	BAS (g)	BT (g)
0 (testigo)	$0,25 \pm 0,03$ b	$1,57 \pm 0,23$ a	$1,83 \pm 0,24$ a
1	$0,47 \pm 0,11$ a	$1,58 \pm 0,24$ a	$2,05 \pm 0,27$ a
3	$0,32 \pm 0,06$ b	$1,59 \pm 0,15$ a	$1,91 \pm 0,14$ a
5	$0,29 \pm 0,07$ b	$1,66 \pm 0,18$ a	$1,95 \pm 0,11$ a
7	$0,31 \pm 0,06$ b	$1,80 \pm 0,17$ a	$2,12 \pm 0,18$ a
CV %	29,82	12,25	10,56

Valores con la misma letra \pm desviación estándar, dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variación. BRS; biomasa radical seca, BAS; biomasa seca y BT; peso seco total de las plántulas.

La respuesta positiva de las plántulas de melón ante la aplicación de la dosis de $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de Si en BRS e ICD, se relaciona con la eficiencia en el uso de los nutrientes. Estos resultados coinciden con los de González *et al.* (2016), quienes mencionaron que las plantas fertilizadas con Si estimulan una mayor biomasa radical. De igual manera, Nayekova *et al.* (2020) indicaron que, en plántulas de cebada nutridas con Si, se observó una mayor biomasa radical y aérea. Mientras que Caicedo y Chavarriaga (2008) expresaron que el Si está asociado al aumento de materia seca de las plantas, respuesta que está influenciada por el complemento del Si con el DAP (Fosfato Diamónico), el cual mostró un efecto significativo sobre la nutrición de las plantas. Al respecto, Asgari *et al.* (2018) señalaron que plantas de avena (*Avena sativa*) tratadas con silicato de sodio y monosilicio (SiNP), en concentraciones de 5 y 10 mM, aumentaron la longitud del tallo, la biomasa fresca y la extracción de brotes y raíces en plantas. Por su parte, Zejun *et al.* (2025) mencionaron que, el Si en plántulas de manglares, originó la acumulación de biomasa, redujo el contenido de agua y mejoró la acumulación de materia seca.

Para la variable IE, se encontró que con $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de Si, se incrementó significativamente con respecto al testigo (24 %); el resto de los

Para BAS, las dosis crecientes de Si indujeron un incremento en 1, 1, 6 y 14 %, con respecto al testigo, sin diferencias estadísticas (Cuadro 2). El BT fue mayor con Si debido a que se observaron incrementos en dicha variable de 12, 4, 7 y 16 % en comparación con el testigo; sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas.

tratamientos presentaron promedios superiores al testigo (entre 3 a 11 %) aunque sin diferencias estadísticas. El índice de esbeltez (IE) se deriva de la AP y DT; debido a que este último no mostró diferencias estadísticas, las variaciones del IE se atribuyen principalmente a la AP. Sin embargo, la BAS no mostró diferencias estadísticas, lo que indica que el mayor crecimiento en altura no se acompañó de una mayor acumulación de materia seca. Esto sugiere un posible crecimiento etiolado, asociado a las condiciones ambientales, que promovió la elongación de tallos sin incrementar la BAS. En BAS/BRS (Cuadro 3), las plántulas tratadas con Si presentaron valores inferiores, con reducciones que oscilaron entre 4 y 43 %, en comparación con las plantas testigo, cuya BAS/BRS solo fue significativamente mayor que la registrada con $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de Si. A medida que el valor de BAS/BRS disminuyó, se evidenció una mayor proporción de BRS. Este patrón se considera favorable, porque un mayor desarrollo del sistema radical mejora la capacidad de absorción de agua y nutrientes, incrementa la estabilidad de la plántula y contribuye a una mayor tolerancia frente a condiciones de estrés.

En ICD se presentó diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$), de manera que las plántulas con una mayor calidad fueron aquellas que se trataron con

1 mg·L⁻¹ de Si, mismas que superaron al testigo en 53 %; el resto de los tratamientos ocasionaron

incrementos que fluctuaron entre 5 y 11 %, aunque estadísticamente igual al testigo.

Cuadro 3. Efecto de silicio sobre la calidad de plántulas de melón (*Cucumis melo* L.).

Dosis de silicio (mg·L ⁻¹)	IE	BAS/BRS	ICD
0 (testigo)	3,52 ± 0,37 b	6,32 ± 1,18 a	0,19 ± 0,02 b
1	3,62 ± 0,25 b	3,56 ± 1,12 b	0,29 ± 0,05 a
3	3,98 ± 0,25 ab	5,10 ± 1,24 ab	0,21 ± 0,02 b
5	3,91 ± 0,38 ab	6,08 ± 1,99 ab	0,20 ± 0,04 b
7	4,35 ± 0,32 a	5,95 ± 1,40 ab	0,21 ± 0,03 b
CV %	10,74	30,66	21,83

Valores con la misma letra ± desviación estándar, dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variación. IE; índice de esbeltez, RPA/RPR; relación parte aérea-parte radical, ICD; índice de calidad de Dickson.

El Si mejoró el IE en dosis de 7 mg·L⁻¹, y el ICD se optimizó con la dosis de 1 mg·L⁻¹ de Si, resultados que coinciden con los de Kaloterakis *et al.* (2021) quienes mencionaron que, en plántulas de pepino bajo condiciones de estrés salino, el Si en dosis de 1,5 mM propició el incremento de varios parámetros en relación con el crecimiento de las plántulas y la disminución de los efectos adversos por la salinidad, lo que benefició la calidad de plántulas. En este sentido, Loaiza (2003), señaló que la aplicación de Si, en condiciones de campo, estimuló el crecimiento de las plantas que se reflejó en el incremento del contenido de materia seca. Además, Nikolaos *et al.* (2021) señalaron que en pepino cultivado en hidroponía (bajo estrés salino 75 mM de NaCl), el silicio en dosis de 1,5 mM mejoró la biomasa de

brotes y raíces de pepino; de igual manera, se observó un aumento en la altura de la planta, el área foliar, el área foliar específica, la longitud de la raíz, la longitud específica de la raíz, el área de la superficie de la raíz y el volumen de la raíz.

Plántulas de pepino. En la variable AP (Cuadro 4), las plántulas de pepino tratadas con Si presentaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Los valores promedio de AP fueron superiores con las dosis de 1, 3 y 5 mg·L⁻¹ de Si en 1, 2 y 8 %, respectivamente, en comparación con el testigo. En contraste, con 7 mg·L⁻¹ de Si la altura disminuyó 7 %, respecto al testigo. La dosis de 7 mg·L⁻¹ produjo una AP significativamente menor que la observada con 3 y 5 mg·L⁻¹ de Si.

Cuadro 4. Comportamiento del crecimiento y verdor foliar de plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) en función al silicio.

Dosis de silicio (mg·L ⁻¹)	AP (cm)	AF (cm ²)	DT (mm)	VF (U. Spad)
0 (testigo)	8,88 ± 1,08 ab	42,53 ± 5,96 b	3,27 ± 0,16 b	33,29 ± 2,14 b
1	8,98 ± 0,88 ab	47,33 ± 7,10 a	3,41 ± 0,18 a	34,75 ± 1,99 a
3	9,05 ± 0,95 a	34,94 ± 5,27 c	2,73 ± 1,18 d	32,51 ± 1,32 b
5	9,55 ± 1,04 a	47,34 ± 6,92 a	3,40 ± 1,18 a	33,29 ± 1,95 b
7	8,33 ± 0,96 b	41,95 ± 6,59 b	3,14 ± 1,19 c	33,76 ± 1,86 ab
CV %	11,67	18,21	9,62	5,93

Valores con la misma letra ± desviación estándar, dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variación. AP; altura de planta, AF; área foliar, DT; diámetro de tallo y VF; verdor foliar.

El AF de las plántulas de pepino presentó diferencias significativas ($p \leq 0,05$); dicha

variable se incrementó con Si solo en dosis de 1 mg·L⁻¹ (11,29 %) y 5 mg·L⁻¹ (11,31 %), respecto

al testigo. El resto de los tratamientos originó promedios inferiores que fluctuaron entre 1 y 18 %, con relación al testigo.

En DT también hubo diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$). El Si únicamente en dosis de 1 y 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ mostró un incremento (4 %) con respecto al testigo, el resto de los tratamientos causaron decrementos que fluctuaron entre 4 y 17 % con respecto al testigo.

El VF se incrementó significativamente ($p \leq 0,05$) solo con la dosis de 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; con el resto de los tratamientos, fue estadísticamente igual.

Al respecto, el Si en dosis de 1 y 7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ mejoraron el VF; en cambio, las dosis crecientes de Si incrementaron AP. Mientras que AF y DT se expresó mejor en plántulas tratadas con las dosis de Si en 1 y 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Estas respuestas coinciden con Cázares *et al.* (2024) quienes mencionaron que en plántulas de pepino tipo "pickle" vr Supremo cultivadas con 20, 30 y 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de Si (dióxido de silicio), el Si estimuló la altura de planta y el área foliar, además de la biomasa. Los resultados de esta investigación también coinciden con los de Reyes *et al.* (2023) quienes demostraron que la aplicación de 10, 12, 14 $\text{g} \cdot \text{planta}^{-1}$ de Si ((SiO₂, MgO, CaO y Fe) en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.) mostró incrementos favorables en el crecimiento y grosor de tallo.

La fertilización con silicio no solo mejora los pigmentos fotosintéticos, el crecimiento, la biomasa, las enzimas antioxidantes, la expresión génica, las concentraciones de osmolitos y la absorción de nutrientes, sino que también mejora la producción de cultivos, el rendimiento y la calidad del grano durante el estrés por sequía (Malik *et al.*, 2021). Además de la interacción favorable que tiene el Si con otros procesos fisiológicos en las plantas, como la absorción de macronutrientes y micronutrientes, y las fitohormonas, que también influyen en la actividad fotosintética (Haghghi *et al.*, 2023).

El Si no mejoró la BRS en plántulas de pepino, y con dosis 3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ se observó una reducción significativa en esta variable con respecto al testigo (Cuadro 5). En BAS, las plántulas tratadas con Si a dosis de 1 y 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ presentaron un promedio estadísticamente igual al testigo; sin embargo, con incrementos de 8,2 y 7,78 %, respectivamente. El resto de los tratamientos originaron decrementos (5 a 19 %) en relación con el testigo. Resultados semejantes se obtuvieron en la variable BT, debido a que, las plántulas tratadas con Si a dosis de 1 y 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ presentaron un promedio estadísticamente igual al testigo; no obstante, con incrementos de 7 y 6 %, respectivamente.

Cuadro 5. Acumulación de biomasa seca de plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) en función al silicio.

Dosis de silicio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BRS (g)	BAS (g)	BT (g)
0 (testigo)	0,52 ± 0,09 a	2,57 ± 0,19 ab	3,09 ± 0,12 ab
1	0,53 ± 0,10 a	2,78 ± 0,16 a	3,30 ± 0,18 a
3	0,34 ± 0,02 b	2,09 ± 0,17 c	2,43 ± 0,18 c
5	0,51 ± 0,12 ab	2,77 ± 0,14 a	3,28 ± 0,13 a
7	0,42 ± 0,09 ab	2,44 ± 0,15 b	2,86 ± 0,19 b
CV %	23,64	11,82	12,08

Valores con la misma letra ± desviación estándar, dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variación. BRS; biomasa radical seca, BAS; biomasa aérea seca y BT; peso seco total de las plántulas.

La dosis de 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de Si, ocasionó la mejor respuesta en BRS, BAS y BT; resultados que coinciden con los de Trejo *et al.* (2020), quienes encontraron en plantas de pimiento, que el Si

aplicado mediante silicato de calcio en dosis de 125 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, optimizó el área foliar, la biomasa fresca y seca en hojas y tallos.

Existe evidencia científica sobre la adquisición, absorción y el transporte de nutrientes mediada por el Si, como por ejemplo, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), cloro (Cl) y níquel (Ni) tanto en condiciones de deficiencia como de exceso (Pavlovic *et al.*, 2021). Sin embargo, las plantas difieren en la capacidad de acumular Si, debido a la diferente expresión y funcionalidad de los transportadores de Si (Coskun *et al.*, 2019). Los resultados de la presente investigación concuerdan con los hallazgos de González *et al.* (2016), quienes mencionaron que el Si estimula el desarrollo de la raíz, lo que le permite a la planta producir mayor biomasa (por la eficiencia del uso

de los nutrientes) y resistir los efectos de la sequía (principalmente en la fase vegetativa).

En IE se expresó con diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$); el mayor IE se observó en las plántulas que fueron tratadas con 3 y 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de Si, cuyos promedios superaron en 24 y 7 %, respectivamente, al testigo; sin embargo, con 1 y 7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de Si el valor absoluto en IE disminuyó en 3 %. En RPA/RPR no se registró diferencia estadística (Cuadro 6). Para ICD, las plántulas tratadas con Si en las dosis de 1 y 5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ presentaron un promedio estadísticamente igual al testigo; en contraste con el resto de las dosis probadas, que originaron decrementos en relación con el testigo.

Cuadro 6. Efecto de silicio sobre la calidad de plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.).

Dosis de silicio ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	IE	BAS/BRS	ICD
0 (testigo)	$2,69 \pm 0,20$ b	$5,07 \pm 1,13$ a	$0,40 \pm 0,04$ a
1	$2,61 \pm 0,24$ b	$5,45 \pm 1,18$ a	$0,42 \pm 0,07$ a
3	$3,33 \pm 0,33$ a	$6,09 \pm 0,40$ a	$0,26 \pm 0,02$ b
5	$2,89 \pm 0,20$ ab	$5,71 \pm 1,45$ a	$0,39 \pm 0,07$ a
7	$2,62 \pm 0,20$ b	$6,03 \pm 1,18$ a	$0,34 \pm 0,07$ ab
CV %	12,44	19,34	21,91

Valores con la misma letra \pm desviación estándar, dentro de columnas, son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variación. IE; índice de esbeltez, RPA/RPR; relación parte aérea-parte radical, ICD; índice de calidad de Dickson.

Se puede inferir que el Si en dosis de 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ mejoró el ICD en plántulas de pepino. En este sentido Enríquez *et al.* (2023) señalaron que, el Si en dosis de 1 y 2 mM (dióxido de silicio amorfo) tiene la capacidad de mejorar el crecimiento de plántulas de tomate, al incrementar longitud de raíz, tallo, biomasa fresca y seca. Al respecto Yan *et al.* (2020) mencionaron que el incremento del peso seco de los tejidos de las plantas se debe a que el Si influye en la tasa fotosintética, como ha sido observado en distintas especies, lo cual favorece una mayor acumulación de materia seca. Estos resultados concuerdan con los de De Mesquita *et al.* (2020), quienes encontraron mayor biomasa seca en calabacín bajo la influencia de Si, debido a que la aplicación de Si y N juntos influyeron positivamente en la relación clorofila a/b y el rendimiento cuántico del fotosistema II. Al respecto, Chourasiya *et al.* (2021) indicaron

que las nanopartículas de Si causan un efecto positivo en semillas de trigo, guisantes y mostaza en porcentaje de germinación de semillas, longitud de los brotes y raíces, longitud de las plántulas e índice de vigor.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de Si evaluadas mejoraron diversas variables morfológicas y fisiológicas en plántulas de melón y pepino, destacando 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ como la dosis más eficiente, al mejorar de manera consistente indicadores de calidad de plántula como la biomasa radical, la biomasa total y el índice de Dickson.

LITERATURA CITADA

1. Ahsan, M., M. Valipour, F. Nawaz, M. Raheel, H.T. Abbas, M. Sajid *et al.* 2023.

- Evaluation of silicon supplementation for drought stress under water-deficit conditions: an application of sustainable agriculture. *Agronomy* 13(2): 599.
2. Altieri, A. 1997. *Agroecología, Base científica para la Agricultura Sustentable*, Asociación cubana de Agricultura Orgánica (ACAO)-CLADES, Habana, Cuba. P. 325.
 3. Asgari, F., A. Majd, P. Jonoubi y F. Najafi. 2018. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry* 127(1):152-160.
 4. Bhardwaj, S y D. Kapoor. 2021. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 166: 1044-1053.
 5. Biju, S., S. Fuentes y D. Gupta. 2023. Novel insights into the mechanism(s) of silicon-induced drought stress tolerance in lentil plants revealed by RNA sequencing analysis. *BMC Plant Biology* 23: 498.
 6. Bist, V., A. Niranjan, M. Ranjan, A. Lehri, K. Seem y S. Srivastava. 2020. Silicon-solubilizing media and its implication for characterization of bacteria to mitigate biotic stress. *Frontiers in Plant Science* 11: 28.
 7. Blanco, F.F y M.V. Folegatti. 2003. A new method for estimating the leaf area index of cucumber and tomato plants. *Horticultura Brasileira* 21(4):666-669.
 8. Caicedo, L.M y W.M. Chavarriaga. 2008. Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agronomía Colombiana* 15(1): 27-37.
 9. Cázares, F.L.Ll., R.L. Partida, A.T.D.J. Velázquez, T.N.D. Zazueta, J.M.D. Yáñez, C.A. Angulo *et al.* 2024. Respuesta de dos variedades de pepino (*Cucumis sativus* L.) al silicio y cloro aplicados en casa sombra. *Terra Latinoamericana* 42: e1620.
 10. Chourasiya, V.K., A. Nehra, P.S. Shukla, K.P. Singh y P.S. Singh. 2021. Impact of Mesoporous Nano-Silica (SiO_2) on Seed Germination and Seedling Growth of Wheat, Pea and Mustard Seed. *Nanosci. Nanotechnol.* 21(6):3566-3572.
 11. Coskun, D., R. Deshmukh, H. Sonah, J.G. Menzies, O. Reynolds, J.F. Ma *et al.* 2019. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist* 221(1):67-85.
 12. De Mesquita, A.J., A.S. de Lima, F.R.A. Figueiredo, T.I. da Silva, C.L. Ferreira, M.F. de Oliveira *et al.* 2020. Fluorescencia de la clorofila ay desarrollo de plantas de calabacín bajo fertilización con nitrógeno y silicio *Agronomía Colombiana* 38(1): 45-52.
 13. Dickson, A., A.L. Leaf y J.F. Hosner. 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle* 36(1):10-13.
 14. Enríquez, A.E.A., E.F.H. Ruiz, M.F.D.J. Carballo, M.F.A. Beltrán, V.C. Vázquez y S.H.D. García. 2023. El silicio como mitigador a salinidad en las variables fisiológicas de germinación de tres variedades de *Solanum lycopersicum*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14(1): 85-96.
 15. Enríquez, A.E.A., R.J.L. Ledea, M.F.de.J. Carballo, E.F.H. Ruiz y M.F.A. Beltrán. 2025. El silicio y su relación con la germinación y los índices relacionados en variedades de *Solanum lycopersicum* L. En condiciones de salinidad. *Terra Latinoamericana* 43.
 16. González, T.A., V.U. Figueroa, R.P. Preciado, H.G. Núñez, O.G. Luna y G.O. Antuna. 2016. Uso eficiente y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero en suelos diferentes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(2): 301-309.
 17. Haghghi, T.M., M.J. Saharkhiz, A. Ramezanian y M. Zarei. 2023. The use of silicon and mycorrhizal fungi to mitigate changes in licorice leaf micromorphology, chlorophyll fluorescence, and rutin content under water-deficit conditions. *Plant Physiol. Bioch.*197: 107662.
 18. Hodson, M.J y D.E. Evans. 2020. Aluminum-silicon interactions in higher plants: an update. *Journal of Experimental Botany* 71(21): 6719-6729.
 19. Kaloterakis, N., D.S.H. Van, S.E. Hartley y G.B. de Deyn. 2021. Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria

- consisting of six pure *Bacillus* species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Scientia Horticulturae* 288: 110383.
20. Kamenidou, S., T.J. Cavins y S.M. Marek. 2010. Silicon supplements affect the quality traits of floriculture and the elemental nutrient concentrations of greenhouse-grown gerberas. *Scientia Horticulturae* 123(3): 390-394.
21. Khan, I., S.A. Awan, M. Rizwan, M. Brestic y W. Xie. 2023. Silicon: an essential element for plant nutrition and phytohormones signaling mechanism under stressful conditions. *Plant Growth Regul.* 100(2): 301-319.
22. Llerena, R.L.T., R.S. Rodríguez, P.J.J. Reyes, Á.S. López, P.M. Jiménez y P.B. Espinosa. 2025. Microorganismos Benéficos y Compost Líquido Enriquecido con Silicio: Alternativas para la Producción Agroecológica del Cultivo de Arroz. *Terra Latinoamericana* 43: 1-15.
23. Loaiza, C. 2003. Fisiología vegetal. Ed. Universidad de Caldas, Manizales. pp. 8-15.
24. Malik, M.A., A.H. Wani, S.H. Mir, I.U. Rehman, I. Tahir, P. Ahmad *et al.* 2021. Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 165: 187-195.
25. Nayekova, S.K., K.M. Aubakirova, K.K. Aitlessov, V.V. Demidchik y Z.A. Alikulov. 2020. Impact of diatomite priming of seeds of *hordeum vulgaris* in salinity. *EurAsian Journal of BioSciences* 14(1): 705-712.
26. Nikolaos, K., H.V.D. Sander, H. Sue y B.D.D. Gerlinde. 2021. Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria consisting of six pure *Bacillus* species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Scientia Horticulturae* 288: 110383.
27. Pavlovic, J., L. Kostic, P. Bosnic, E.A. Kirkby y M. Nikolic. 2021. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science* 12: 697592.
28. Reyes, P.J.J., R.S. Rodríguez, R.J.A. Torres, R.L.T. Llerena, M.L.G. Hernández y E.F.H. Ruiz. 2023. Biofortificación con silicio en el crecimiento y rendimiento de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en ambiente controlado. *Terra Latinoamericana* 41:1-10.
29. Schmidt, V.H. 1980. Characterization of plant material, IUFRO Meeting.S1.05-04. En Röhrling E, Gussone HA.Waldbau.Zweiter band.Sechste Auflage, Neubearbeitet. Hamburgund, Berlin, 1990. 314 pp
30. Trejo, T.L.I., J.A. García, S.H.F. Escobar, O.S.M. Ramírez, B.J.J. Bello y M.F.C. Gómez. 2020. Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *PeerJ* 8(14078): e9224.
31. Vinaykumar, R., K. Manish, N. Narendar, C. Sohini, K. Monit, S. Sangram *et al.* 2024. Silicon derived benefits to combat biotic and abiotic stresses in fruit crops: Current research and future challenges. *Plant Physiology and Biochemistry* 211: 108680.
32. Wang, Z., Y. Wang, J. Lü, T. Li, S. Li, M. Nie *et al.* 2024. Silicon and selenium alleviate cadmium toxicity in *Artemisia selengensis* Turcz by regulating the plant-rhizosphere. *Environmental Res.* 252:119064.
33. Xu, T., J. Ke, Y. Wang, Y. Zhang, J. Xi, X. Wei *et al.* 2024. Silicon Fertilization Improves Sunflower Rhizosphere Microbial Community Structure and Reduces Parasitism by *Orobanche cumana* Wallr. *Agronomy* 14(6): 1312.
34. Yan, G., X. Fan, M. Peng, C. Yin, Z. Xiao y Y. Liang. 2020. Silicon improves rice salinity resistance by alleviating ionic toxicity and osmotic constraint in an organ-specific pattern. *Frontiers in Plant Science* 11: 260.
35. Zejun, G., L. Siyao, X. Chaoqun, W. Mingyue, S. Lingyu, H. Hezi *et al.* 2025. Silicon enhances potassium uptake and leaf growth in *Avicennia marina*, a silicon-accumulating mangrove plant with silicon transporters. *Industrial Crops and Products* 222: 120876.

