

Eficacia de Nanopartículas de Silicio y Codasil® como Potenciales Bioestimulantes en Frijol Ejotero Efficacy of Silicon Nanoparticles and Codasil® as Potential Biostimulants in Green Beans

Julio César Anchondo-Páez¹ , Esteban Sánchez-Chávez^{1†} ,
Carlos Abel Ramírez-Estrada¹ , Alondra Salcido-Martínez¹ ,
Erick Humberto Ochoa-Chaparro¹ y Ezequiel Muñoz-Márquez¹

Centro de investigación en Alimentación y Desarrollo A. C., Unidad Delicias. Av. 4 sur 3820, Fracc. Vencedores del Desierto. 33089 Cd. Delicias, Chihuahua, México; (J.C.A.P.), (E.S.C.), (C.A.R.E.), (A.S.M.), (E.H.O.C.), (E.M.M.).

† Autor para correspondencia: esteban@ciad.mx

RESUMEN

La demanda mundial de alimentos ha crecido sustancialmente debido al aumento de la población, donde los bioestimulantes a base de silicio (Si) ofrecen una alternativa sustentable para la producción de alimentos. El Si juega un papel importante en mitigar el estrés abiótico. Por consiguiente, en los últimos años han surgido propuestas innovadoras para el abastecimiento de silicio, destacando la aplicación de nanopartículas de silicio debido a sus propiedades fisicoquímicas que facilitan su absorción por parte de la planta y se le atribuye una función como bioestimulante. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar la eficacia de la aplicación de nanopartículas de silicio y el producto comercial a base de Si Codasil® como un potencial bioestimulante sobre la biomasa, rendimiento, actividad fotosintética y tasa de transpiración en frijol ejotero. El estudio fue realizado bajo condiciones de malla sombra en Delicias, Chihuahua, México durante el periodo agosto-octubre 2022. Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con dos fuentes de silicio: un formulado de nanopartículas de dióxido de silicio + KNO₃ (NanoSi) y el producto comercial Codasil® a dosis de 0, 1, 2, y 4 mM, aplicados semanalmente vía foliar. Los resultados obtenidos indican que el tratamiento de nanopartículas de silicio a 1 mM mejoró la biomasa total, el rendimiento y la actividad fotosintética; mientras que Codasil a 4 mM redujo la transpiración al mismo tiempo que incrementó la biomasa total y rendimiento. Finalmente, se concluye que la aplicación foliar de NanoSi a 1 mM y Codasil® a 4 mM funcionan como bioestimulante para mejorar el crecimiento y el rendimiento del frijol ejotero.

Palabras clave: actividad fotosintética, nanotecnología, *Phaseolus vulgaris* L.

SUMMARY

Global food demand has grown substantially due to population growth, where silicon (Si)-based biostimulants offer a sustainable alternative for food production. Si plays an important role in mitigating abiotic stress. Therefore, innovative proposals for silicon supply have emerged in recent years, highlighting silicon nanoparticle application due to their physicochemical properties that facilitate plant absorption and have a biostimulatr function. Therefore, the objective of the present research is to evaluate the application efficacy of silicon nanoparticles and silico-based commercial product Codasil® as a potential biostimulant on biomass, yield, photosynthetic activity and transpiration rate in green beans. The study was conducted under shade net conditions in Delicias, Chihuahua, Mexico during August-October 2022 period. A completely randomized experimental design was used, with two silicon



Cita recomendada:

Anchondo-Páez, J. C., Sánchez-Chávez, E., Ramírez-Estrada, C. A., Salcido-Martínez, A., Ochoa-Chaparro, E. H., & Muñoz-Márquez, E. (2024). Eficacia de Nanopartículas de Silicio y Codasil® como Potenciales Bioestimulantes en Frijol Ejotero. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-10. e1885. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1885>

Recibido: 31 de enero de 2024.

Aceptado: 3 de abril de 2024.

Artículo. Volumen 42.

Junio de 2024.

Editor de Sección:

Dr. Luis Hernández Adame

Editor Técnico:

Dr. Benjamín Zamudio González



Copyright: © 2024 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/>).

sources: silicon dioxide nanoparticles + KNO₃ (NanoSi) and the commercial product Codasil® at doses of 0, 1, 2, and 4 mM, applied weekly via foliar application. The results obtained indicate that 1 mM silicon nanoparticle treatment improved total, yield and photosynthetic activity, while 4 mM Codasil reduced transpiration, increasing total biomass and yield. To conclude, foliar application of NanoSi at 1 mM and Codasil at 4 mM both work as biostimulants to improve green bean growth and yield.

Index words: *photosynthetic activity, nanotechnology, Phaseolus vulgaris L.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda de alimentos ha crecido de manera importante debido al crecimiento exponencial de la población a nivel mundial. El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es la leguminosa más importante a nivel mundial, donde más de 300 millones de personas consumen sus vainas o semillas secas (Palacio-Márquez *et al.*, 2021; Vougeleka *et al.*, 2023). Su alto valor nutricional, contenido de compuestos bioactivos, proteínas, vitaminas y elementos esenciales como el hierro y zinc lo hace especialmente importante para la canasta básica de los países en desarrollo (Uebersax *et al.*, 2023). Sin embargo, para satisfacer la demanda de frijol a nivel mundial, se ha incrementado el uso de fertilizantes químicos para asegurar la producción del cultivo. (Mannino, Gentile, Ertani, Serio y Berteau, 2021). En consecuencia, el uso desmedido de fertilizantes provoca contaminación ambiental y la pérdida de la calidad de la producción (Di Mola *et al.*, 2019).

Por tal razón, Los bioestimulantes ofrecen una solución alternativa para los sistemas productivos, ya que tienen el potencial de regular o modificar los procesos fisiológicos para incentivar el crecimiento, mitigar factores de estrés e incrementar el rendimiento (Brown y Saa, 2015). Para que un bioestimulante sea considerado como tal, debe funcionar a dosis bajas y tener efectos benéficos sobre los cultivos, por ejemplo, estimular la floración o aumentar el uso eficiente de nutrientes (La Bella *et al.*, 2021; Navarro-León *et al.*, 2022). Normalmente están compuestos de diversas sustancias como aminoácidos, oligosacáridos, hormonas vegetales y elementos minerales. Un ejemplo de esta última categoría es el producto comercial Codasil®, que contiene aminoácidos, Si y potasio (K), fue desarrollado para estimular el crecimiento y desarrollo vegetal, así como la tolerancia al estrés. Codasil® ha mostrado efectos benéficos en lechuga, un alimento donde la acumulación de biomasa verde es importante, como es el caso del frijol ejotero. Su aplicación mitigó los efectos negativos del estrés hídrico al reducir la peroxidación de lípidos, concentración de peróxido y proteger el aparato fotosintético (Hidalgo-Santiago *et al.*, 2021). Además, Codasil® es un producto fácilmente disponible y de menor precio que otros compuestos, como las nanopartículas.

El silicio no es considerado un elemento esencial para la nutrición vegetal. No obstante, se han publicado evidencias que la absorción de silicio (Si) está relacionado con distintos beneficios como mayor acumulación de biomasa, facilitar la absorción de nutrientes, mayor tolerancia a la sequía, mitigación del daño por toxicidad de metales pesados y reducción del daño por estrés oxidativo (Azad *et al.*, 2021; Koleva *et al.*, 2022).

En consecuencia, la deficiencia de Si pudiera traer consecuencias negativas para el crecimiento de las plantas especialmente bajo condiciones de estrés debido a su capacidad para aminorar efectos negativos (Pavlovic *et al.*, 2021). Existe un interés creciente para la utilización de Si en la producción de los cultivos, con distintas alternativas disponibles para su aplicación (Fraceto *et al.*, 2016). En ese sentido, el uso de nanopartículas cada vez está ganando mayor importancia porque contribuye al desarrollo de nuevas estrategias sustentables para el crecimiento de los cultivos, gracias a su menor tamaño (10-100 nm), mayor solubilidad y reactividad de la superficie (Fraceto *et al.*, 2016).

El empleo de nanopartículas de Si (NanoSi) ha sido documentado en distintos cultivos, como el trigo, tomate y arroz donde el abastecimiento de NanoSi potencia la acumulación de biomasa al mejorar la absorción mineral y regular hormonas vegetales como la auxina y ácido abscísico (Li *et al.*, 2023). Además, aumenta la resistencia al estrés hídrico mediante el incremento de la turgencia celular y regulación de apertura de estomas (Ning *et al.*, 2020), confiere mayor resistencia al estrés oxidativo al proteger a los cloroplastos de las especies reactivas de oxígeno mediante el refuerzo de la actividad de enzimas antioxidantes como la catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD) y peroxidasa (POD) (Elshayb, Nada, Ibrahim, Amin y Atta, 2021). Dicho de otro modo, el Si tiene un papel importante al generar señales bioquímicas para provocar cambios en las rutas metabólicas y fisiológicas de las plantas en respuesta a las condiciones ambientales (Savvas y Ntatsi, 2015; Verma *et al.*, 2022). En general, la información de los mecanismos de acción de la aplicación de NanoSi es limitada, ya que los efectos de NanoSi son dependientes de la especie vegetal y se desconocen ciertos aspectos de la interacción del silicio con la planta (Le *et al.*, 2014).

Por lo tanto, el objetivo de la siguiente investigación fue evaluar estudiar la eficacia de la aplicación, y documentar los efectos de NanoSi y Codasil®, como potenciales bioestimulantes que mejoran en la acumulación de biomasa, rendimiento, actividad fotosintética y tasa de transpiración en el cultivo del frijol ejotero cv. Strike.

MATERIALES Y MÉTODOS

Manejo del Cultivo

El experimento fue establecido bajo condiciones de malla sombra en Cd. Delicias, Chihuahua, México (28° 11' 36" N, 105° 28' 16" O) durante el periodo de agosto - octubre del 2022. Las semillas utilizadas fueron de frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Strike, las cuales se sembraron en macetas de plástico de 13.4 L de capacidad rellenas con mezcla de sustrato de vermiculita y perlita en una proporción de 2:1 (dos plantas por maceta). La solución nutritiva utilizada fue la de Hoagland, modificada por Sánchez, Rivero, Ruiz y Romero (2004) para la irrigación de las plantas compuesta por 6 mM NH_4NO_3 , 1.6 mM K_2HPO_4 , 0.3 mM K_2SO_4 , 4 mM CaCl_2 , 1.4 mM MgSO_4 , 5 μM Fe-EDDHA, 2 μM MnSO_4 , 0.25 μM CuSO_4 y 0.5 μM H_3BO_3 preparada con agua destilada con un pH de 6.0-6.1 y con conductividad eléctrica de 2 dS m^{-1} . Esta solución fue aplicada a un volumen de 0.5 L por maceta cada tercer día hasta los 30 días después de la germinación del cultivo, donde posteriormente se aplicó un L de solución cada tercer día hasta la cosecha (60 días después de la germinación del cultivo). Los siete tratamientos descritos más abajo fueron asperjados foliarmente a partir de la aparición de las primeras hojas verdaderas, cada siete días para un total de 5 aplicaciones en horario vespertino durante un periodo de dos meses.

Diseño Experimental y Tratamientos

Se utilizó un diseño completamente al azar con 7 tratamientos que consistieron en la aplicación de las dosis del formulado de NanoSiO_2 + 1 mM KNO_3 (NanoSi) y Codasil® al 0, 1, 2 y 4 mM. (Cuadro 1). Las nanopartículas fueron proporcionadas por la empresa Investigación y Desarrollo de Nanomateriales (Figura 1). Dado que el Codasil® contiene K y N en forma de aminoácidos, se añadió KNO_3 en cantidad equivalente de N al NanoSi. Todos los tratamientos tuvieron 6 repeticiones y fueron aplicados foliarmente.

Características de los Productos de Silicio Utilizados

A continuación, se presentan las composiciones químicas de los tratamientos empleados en la presente investigación (Cuadro 2).

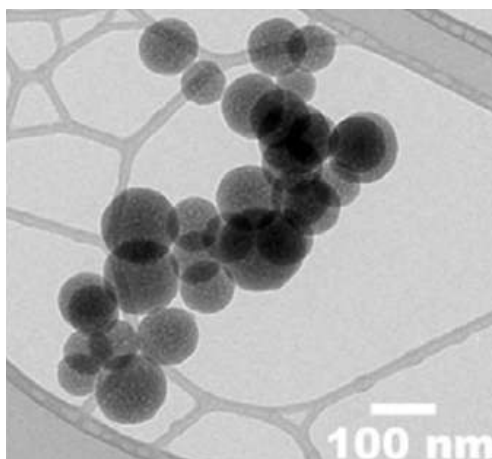


Figura 1. Microscopia electrónica de transmisión de nanopartículas de Si.
Figure 1. Transmission electronic microscopy of Si nanoparticles.

Cuadro 1. Descripción de tratamientos de Silicio aplicados en las plantas de frijol ejotero cv. Strike.
Table 1. Description of silicon treatments applied on green bean plants cv. Strike.

Tratamiento	Dosis de Silicio aplicado (mM)	Código
Control	0	Control
NanoSiO ₂ + KNO ₃	1	NanoSi1
NanoSiO ₂ + KNO ₃	2	NanoSi2
NanoSiO ₂ + KNO ₃	4	NanoSi4
Codasil®	1	Codasil1
Codasil®	2	Codasil2
Codasil®	4	Codasil4

Muestreo Vegetal

Análisis vegetal. Las plantas fueron cosechadas para análisis a los 60 días después de la germinación (a madurez fisiológica), y lavadas con agua de la llave y agua destilada dos veces. Luego las muestras fueron secadas para cuantificar su peso.

Biomasa total. La biomasa incluyó el peso seco de todos los órganos, expresando por separado el peso seco y fresco de las vainas. El material cosechado fue secado en un horno (Shell Lab Forced Air Laboratory Oven SMO14-108 2, Baltimore, USA) a 70 °C por 72 h (Hernández-Figueroa *et al.*, 2024). Posteriormente se utilizó una balanza analítica (AND HR-120, San José, California, USA) para cuantificar el peso y se expresó en gramos planta de peso seco (g planta⁻¹ p.s.).

Rendimiento. El rendimiento de la planta se expresó como el promedio del peso de los frutos por planta (Ponce-García *et al.*, 2019) y se cuantificó en gramos planta peso fresco (g planta⁻¹ p.f.).

Actividad fotosintética y tasa de transpiración. La actividad fotosintética y la tasa de transpiración se midieron en las hojas cuando la planta alcanzó su madurez fisiológica (Kocal, Sonnewald y Sonnewald, 2008). Las lecturas fueron realizadas con un medidor portátil LI-COR 6400 (Lincoln, Nebraska, USA) en cada planta, escogiendo hojas sanas y libres de daño. Una concentración 400 µmol mol⁻¹ de CO₂ fue utilizada para la celda de referencia, mientras que una concentración de 380 µmol mol⁻¹ de CO₂ fue usada para la celda de muestra. El déficit de presión de vapor del aire en la cámara de muestreo era menor a 1.5 kPa y la temperatura del bloque que almacena la hoja era de 30 °C. La actividad fotosintética se expresó como µmol de CO₂ m² s⁻¹ y la tasa de transpiración en mmol H₂O metros⁻² segundo⁻¹.

Cuadro 2. Composición química de las nanopartículas de SiO₂ y el producto Codasil® aplicadas en las plantas de frijol ejotero cv. Strike.
Table 2. Chemical composition of SiO₂ nanoparticles and Codasil® product applied on green bean plants cv. Strike.

Producto de Silicio utilizado	Composición química
1, 2 y 4 mM Nanopartículas de SiO ₂ + 1mM de KNO ₃	Tamaño promedio de 70-90 nm
	Peso Molecular de 60.08 g mol ⁻¹
	Densidad: 2.648 g cm ⁻³
	Pureza: 99.9%
Producto Codasil®	SiO ₂ (26.1% p/v)
	K ₂ O (14.6% p/v).
	Aminoácidos libres (5.2% p/v).

Análisis Estadístico

A los datos obtenidos se les realizó un análisis de varianza y una prueba de separación medias mediante el método de LSD (95%), usando el software estadístico SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2004). Los datos presentados son los valores medios \pm error estándar (e.s.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa Total

La acumulación de biomasa es el producto final de la fotosíntesis de la planta, donde la distribución de biomasa a los órganos reproductivos es esencial para obtener mayores rendimientos (Gao *et al.*, 2009). El análisis de varianza para esta variable mostró diferencias significativas entre los tratamientos, con un nivel de confianza del 95%. Posteriormente, la prueba de separación de medias por LSD ($P \leq 0.05$) mostró que los tratamientos NanoSi4, NanoSi1, Codasil1 y Codasil4 presentaron mayor acumulación de biomasa total en comparación con el control (sin aplicación de Si), con un incremento del 16% en el caso del NanoSi4 (Figura 2).

(El-Saadony *et al.*, 2021) encontró que la aplicación de NanoSi en frijol con toxicidad de metales pesados incrementó la actividad fotosintética, conductancia estomática y el sistema antioxidante. La mejora de estos procesos podría incrementar la acumulación de biomasa.

Debe observarse que el Codasil contiene no solamente Si, sino aminoácidos que son fuente de N. En trabajos previos con bioestimulantes de composición heterogénea, los aminoácidos y elementos minerales impulsaron el crecimiento al aportar compuestos orgánicos, mejorar el balance hídrico y facilitar la absorción de macro y micronutrientes (Kocira *et al.*, 2020). Aunque las concentraciones de hormonas vegetales no se midieron, otros autores han documentado que la aplicación de aminoácidos incrementa el contenido de giberelinas, citoquininas y auxinas o bien muestran comportamientos similares a estas fitohormonas (Colla, Roupael, Canaguier, Svecova y Cardarelli, 2014; El-Gamal, Abd El-Aal, El-Desouky, Khedr y Abo Shady, 2016). En nuestro trabajo se aportó KNO_3 a otros tratamientos (NanoSi) con el fin de compensar la carga de N y K de Codasil, aunque considerando que son fuentes de N mineral y orgánico respectivamente.

Rendimiento

El rendimiento de los cultivos es determinado por múltiples factores como el genotipo, medio ambiente y sus interacciones (Khaki y Wang, 2019). En el presente estudio, la aplicación de las distintas dosis NanoSi y Codasil4 mejoraron los rendimientos, a diferencia de los tratamientos Codasil1 y Codasil2. Dentro de los tratamientos de NanoSi, la dosis de 2 mM presentó los mayores rendimientos, con un aumento del 36% comparado con el control (Figura 3), aunque estas diferencias no fueron significativas con las demás dosis de NanoSi. Respecto a

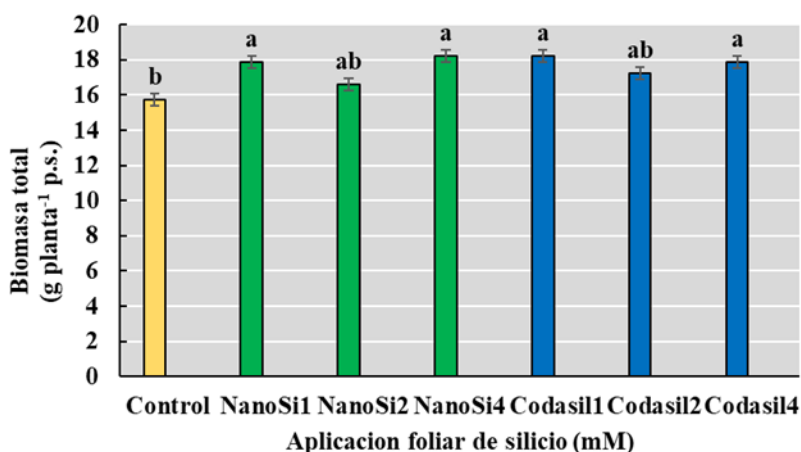


Figura 2. Efecto de la aplicación foliar de silicio sobre la biomasa total por planta en frijol ejotero cv. Strike. Las letras diferentes presentan diferencias estadísticas entre ellas (LSD $P \leq 0.05$).

Figure 2. Effect of silicon foliar application on total biomass per plant in green bean cv. Strike. Different letters show least statistical differences between them (LSD $P \leq 0.05$).

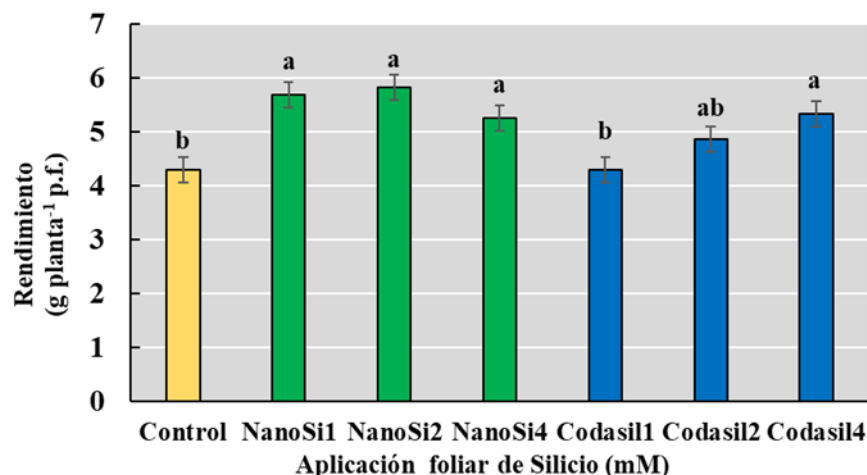


Figura 3. Efecto de la aplicación foliar de silicio sobre el rendimiento en frijol ejotero cv. Strike. Las letras diferentes presentan diferencias estadísticas entre ellas (LSD $P \leq 0.05$).
Figure 3. Effect of silicon foliar application in green bean cv. Strike yield. Different letters show least statistical differences between them (LSD $P \leq 0.05$).

estas diferencias, es posible que el menor tamaño de partícula sea el factor fundamental que facilita la absorción de Si dentro de la planta (Wang, Xie, Wang y Yin, 2023). Además, se ha reportado que NanoSi podría ayudar con el transporte de sustancias capaces de modular el metabolismo vegetal y varios procesos fisiológicos (Souri, Khanna, Karimi y Ahmad, 2021). En su trabajo con habas, Desoky *et al.*, (2021) reportaron que la aplicación de NanoSi mejoró el intercambio gaseoso, en especial la fotosíntesis además de otras actividades fisiológicas. La regulación de dichos procesos por acción del NanoSi podría explicar los mayores rendimientos encontrados en estos tratamientos.

En el caso de Codasil, Codasil4 mostró el mayor rendimiento sin diferencias significativas con Codasil2. De manera similar a NanoSi, los distintos componentes de Codasil (aminoácidos, K_2O y Si) influyen en distintos procesos fisiológicos dentro de la planta (Hidalgo-Santiago *et al.*, 2021). Si bien no se midió la concentración de aminoácidos en este estudio, otros trabajos han reportado que los aminoácidos son esenciales para el crecimiento vegetal al actuar como parte de las proteínas, como moléculas señalizadoras e influenciar la turgencia celular y el balance osmótico dentro de la planta (Kauffman, Kneivel y Watschke, 2007). Otro efecto documentado por Shahrajabian, Cheng y Sun (2022) es la regulación de la apertura estomática, activación de enzimas y regulación de transporte de sustancias. De manera similar se ha determinado el efecto del K en el mantenimiento de la turgencia celular y la regulación de la apertura estomática. En el caso de Codasil4, es posible que las mayores dosis incrementen la concentración de aminoácidos y K_2O , potenciando su efecto en la turgencia celular, tasa de transpiración y balance osmótico, mejorando el balance hídrico de la planta (Figura 2).

Actividad Fotosintética

La fotosíntesis es el proceso por el cual la energía solar, dióxido de carbono y agua se transforman en energía química y biomasa, que son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Simkin, Faralli, Ramamoorthy y Lawson, 2020). Es por ello, que cualquier alteración del funcionamiento normal del proceso fotosintético afecta la disponibilidad de carbono, así como, la acumulación de especies reactivas de oxígeno (Jalil, Ahmad y Ansari, 2017; Hasanuzzaman *et al.*, 2018b). En el presente estudio, la aplicación foliar de silicio fue benéfica para la actividad fotosintética, donde el tratamiento de NanoSi1 mostró la mayor actividad comparada con el control, con un aumento del 50% (Figura 4). Este incremento podría ser debido a la acción reguladora del Si sobre la conductancia estomática, el refuerzo del sistema antioxidante y enzimas que participan en la fijación de CO_2 durante la fase oscura de la fotosíntesis, como la Rubisco (Hao *et al.*, 2023). Mahmoud *et al.*, (2022) reportaron que la aplicación de NanoSi en papas mejoró la conductancia estomática, el contenido de clorofila en las hojas, la concentración de CO_2 intracelular y la cantidad de luz absorbida optimizando la fotosíntesis.

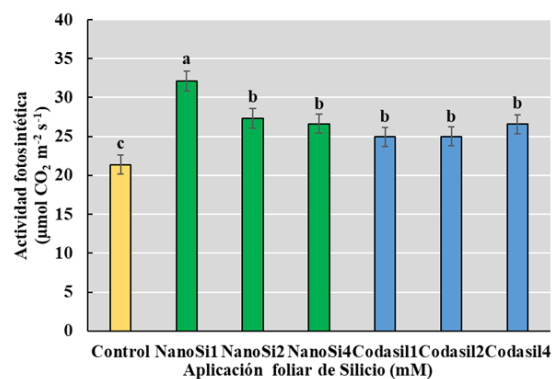


Figura 4. Efecto de la aplicación foliar de silicio sobre la actividad fotosintética en frijol ejotero cv. Strike.

Las letras diferentes presentan diferencias estadísticas entre ellas (LSD $P \leq 0.05$).

Figure 4. Effect of silicon foliar application on photosynthetic activity in green bean cv. Strike.

Different letters show least statistical differences between them (LSD $P \leq 0.05$).

Además, se ha reportado que el sistema antioxidante de soja es fortalecido al acelerar la actividad antioxidante enzimática (SOD, POD y CAT) y no enzimáticas (ácido ascórbico y GSH), limitando el daño celular por peroxidación de lípidos hidrico, protegiendo el aparato fotosintético de las especies reactivas de oxígeno (Iqbal *et al.*, 2019). Un aspecto importante durante la actividad fotosintética es la fijación de CO₂, realizado por varias enzimas, entre ellas la Rubisco. La aplicación de distintas dosis de NanoSi en hojas de maíz demostró una tendencia donde las dosis bajas (150 mg L⁻¹) aceleraron la actividad de la Rubisco y la dosis más alta (2500 mg L⁻¹) disminuyó tal actividad. Por la tanto la dosis adecuada de NanoSi podría eficientizar la apertura estomática, optimizar la fotosíntesis y estimular enzimas fotosintéticas para impulsar el crecimiento del maíz (Hao *et al.*, 2023) Todos estos efectos serían una posible explicación del porque el mejor desempeño de NanoSi1 en este parámetro y su disminución conforme aumentan las dosis. Xie, Song, Xu, Shao y Song (2014) sugirieron que el aumento del tamaño de los cloroplastos y el incremento del número de grana en las hojas podría optimizar la actividad fotosintética.

Tasa de Transpiración

La transpiración se refiere al movimiento del agua a través de plantas vivas. Las tasas de transpiración están controladas por los efectos combinados de impulsores biofísicos (temperatura, déficit de presión de vapor de agua y radiación neta) y la conductancia estomática (Kirschbaum y McMillan, 2018). En el presente estudio, el tratamiento Codasil1 mostró las menores tasas de transpiración comparados con el resto de los tratamientos, reduciendo en un 32% la tasa de transpiración que el control (Figura 5).

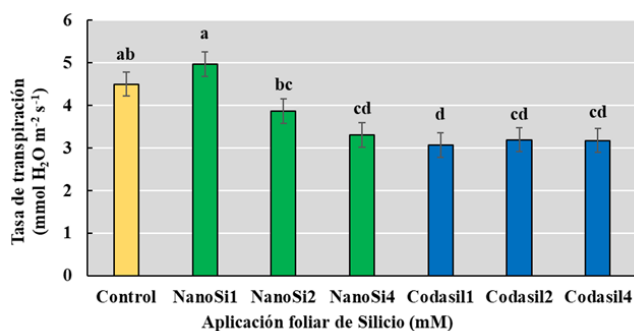


Figura 5. Efecto de la aplicación foliar de silicio sobre la tasa de transpiración en frijol ejotero cv. Strike. Las letras diferentes presentan diferencias estadísticas entre ellas (LSD $P \leq 0.05$).

Figure 5. Effect of silicon foliar application on transpiration rate in green bean cv. Strike. Different letters show least statistical differences between them (LSD $P \leq 0.05$).

Esto es posible debido a que Si pudiera elevar el contenido de agua al reducir la transpiración por los estomas al mismo tiempo que incrementa la turgencia celular y la absorción de K^+ (Tahir, Aziz, Farooq y Sarwar, 2012). Además, la presencia adicional de K^+ en la composición de Codasil también podría auxiliar en la regulación de la apertura y cierre estomático, eficientizando el uso del agua (Kumar *et al.*, 2020). Ciertamente, el K^+ está involucrado en la regulación osmótica, en el funcionamiento de las acuaporinas y el mantenimiento de la turgencia celular (Hasanuzzaman *et al.*, 2018a). Es por ello que un movimiento más eficiente del agua junto con una mejor absorción de nutrientes mejora el desempeño en todas las actividades fisiológicas de las células vegetales (Desoky *et al.*, 2021). La elevada tasa de transpiración de NanoSi1 sugiere una mayor actividad fotosintética, ya que a mayor entrada de CO_2 se incrementa la pérdida de agua de las hojas. Al-Selwey, Alsadon, Ibrahim, Labis y Seleiman (2023) reportaron que la optimización de la conductancia estomática incremento la actividad fotosintética y la tasa de transpiración en papa bajo estrés hídrico, lo que incrementó el rendimiento.

CONCLUSIONES

Se tuvo la mayor tasa fotosintética en frijol ejotero con la aplicación de NanoSi1, si bien este tratamiento presentó una de las mayores tasas de transpiración comparable a la del testigo. Esta mayor actividad fotosintética demostrada por la aplicación de NanoSi1 podría equipar la acumulación de biomasa y rendimiento de NanoSi2 y NanoSi4 con una menor dosis. Con respecto a la tasa de transpiración, el tratamiento Codasil1 mostró la menor la tasa de transpiración, si bien no presento diferencias significativas con Codasil2, Codasil4 y NanoSi4. Estas menores tasas de transpiración posiblemente incrementaron la biomasa del frijol ejotero. Sin embargo, la acumulación de biomasa en Codasil1 no se reflejó en mayores rendimientos comparado con Codasil2 y Codasil4. La fuente y dosis de Si afectaron la actividad fotosintética y las tasas de transpiración para incrementar la biomasa y rendimiento. Finalmente, tanto el NanoSi (1 mM) como Codasil (4mM) funcionan como bioestimulantes y son alternativas innovadoras para mejorar el crecimiento y la producción de frijol ejotero.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

Todos los autores han leído y aprobado el manuscrito final y han dado su consentimiento para su publicación.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACION

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: E.S.C. Metodología: J.C.A.P., C.A.R.E., A.S.M., E.M.M. y E.H.O.C. Investigación: J.C.A.P., C.A.R.E., A.S.M., E.M.M. y E.H.O.C. Recursos: E.S.C. Preparación del borrador original: J.C.A.P. y E.S.C. Escritura: revisión y edición: J.C.A.P. y E.S.C. Supervisión: E.S.C. Administración del proyecto: E.S.C. Adquisición de fondos: E.S.C.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología (CONAHCYT), a la Coordinación Académica de CIAD DELICIAS, al Grupo de Investigación y Laboratorio de Fisiología y Nutrición Vegetal del CIAD Delicias.

LITERATURA CITADA

- Al-Selwey, W. A., Alsadon, A. A., Ibrahim, A. A., Labis, J. P., & Seleiman, M. F. (2023). Effects of zinc oxide and silicon dioxide nanoparticles on physiological, yield, and water use efficiency traits of potato grown under water deficit. *Plants*, 12(1), 218. <https://doi.org/10.3390/plants12010218>
- Azad, M. O. K., Park, B. S., Adnan, M., Germ, M., Kreft, I., Woo, S. H., & Park, C. H. (2021). Silicon biostimulant enhances the growth characteristics and fortifies the bioactive compounds in common and Tartary buckwheat plant. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 24, 51-59.
- Brown, P., & Saa, S. (2015). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 6, 155882.
- Colla, G., Roupahel, Y., Canaguier, R., Svecova, E., & Cardarelli, M. (2014). Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis. *Frontiers in Plant Science*, 5, 110917. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00671>
- Desoky, E. S. M., Mansour, E., El-Sobky, E. S. E., Abdul-Hamid, M. I., Taha, T. F., Elakkad, H. A., ... & Yasin, M. A. (2021). Physio-biochemical and agronomic responses of faba beans to exogenously applied nano-silicon under drought stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 12, 637783. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.637783>
- Di Mola, I., Ottaiano, L., Cozzolino, E., Senatore, M., Giordano, M., El-Nakhel, C., ... & Mori, M. (2019). Plant-based biostimulants influence the agronomical, physiological, and qualitative responses of baby rocket leaves under diverse nitrogen conditions. *Plants*, 8(11), 522. <https://doi.org/10.3390/plants8110522>
- El-Gamal, I. S., Abd El-Aal, M. M. M., El-Desouky, S. A., Khedr, Z. M., & Abo Shady, K. A. (2016). Effect of some growth substances on growth, chemical compositions and root yield productivity of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plant. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 5(2), 171-185.
- El-Saadony, M. T., Desoky, E. S. M., Saad, A. M., Eid, R. S., Selem, E., & Elrys, A. S. (2021). Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris* L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. *Journal of Environmental Sciences*, 106, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.012>
- Elshayb, O. M., Nada, A. M., Ibrahim, H. M., Amin, H. E., & Atta, A. M. (2021). Application of silica nanoparticles for improving growth, yield, and enzymatic antioxidant for the hybrid rice ehr1 growing under water regime conditions. *Materials*, 14(5), 1150. <https://doi.org/10.3390/ma14051150>
- Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*, 4, 186737. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>
- Gao, X., Sun, J., Gao, J., Feng, B., Wang, P., & Chai, Y. (2009). Accumulation and transportation characteristics of dry matter after anthesis in different mung bean cultivars. *Acta Agronomica Sinica*, 35(9), 1715-1721.
- Hao, Y., Yu, Y., Sun, G., Gong, X., Jiang, Y., Lv, G., ... & Qian, C. (2023). Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Nano-Silica on Root Development, Leaf Photosynthesis, Active Oxygen and Nitrogen Metabolism in Maize. *Plants*, 12(8), 1604. <https://doi.org/10.3390/plants12081604>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Nahar, K., Hossain, M. S., Mahmud, J. A., Hossen, M. S., ... & Fujita, M. (2018a). Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(3), 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Hasanuzzaman, M., Oku, H., Nahar, K., Bhuyan, M. B., Mahmud, J. A., Baluska, F., & Fujita, M. (2018b). Nitric oxide-induced salt stress tolerance in plants: ROS metabolism, signaling, and molecular interactions. *Plant Biotechnology Reports*, 12, 77-92.
- Hernández-Figueroa, K. I., Sánchez, E., Ramírez-Estrada, C. A., Anchondo-Páez, J. C., Ojeda-Barrios, D. L., & Pérez-Álvarez, S. (2024). Efficacy and Differential Physiological-Biochemical Response of Biostimulants in Green Beans Subjected to Moderate and Severe Water Stress. *Crops*, 4(1), 27-42. <https://doi.org/10.3390/crops4010003>
- Hidalgo-Santiago, L., Navarro-León, E., López-Moreno, F. J., Arjón, G., González, L. M., Ruiz, J. M., & Blasco, B. (2021). The application of the silicon-based biostimulant Codasil® offset water deficit of lettuce plants. *Scientia Horticulturae*, 285, 110177. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110177>
- Iqbal, N., Hussain, S., Raza, M. A., Yang, C. Q., Safdar, M. E., Brestic, M., ... & Liu, J. (2019). Drought tolerance of soybean (*Glycine max* L. Merr.) by improved photosynthetic characteristics and an efficient antioxidant enzyme activities under a split-root system. *Frontiers in Physiology*, 10, 786. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00786>
- Jalil, S. U., Ahmad, I., & Ansari, M. I. (2017). Functional loss of GABA transaminase (GABA-T) expressed early leaf senescence under various stress conditions in *Arabidopsis thaliana*. *Current Plant Biology*, 9, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2017.02.001>
- Kauffman, G. L., Kneivel, D. P., & Watschke, T. L. (2007). Effects of a biostimulant on the heat tolerance associated with photosynthetic capacity, membrane thermostability, and polyphenol production of perennial ryegrass. *Crop science*, 47(1), 261-267. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.03.0171>
- Khaki, S., & Wang, L. (2019). Crop yield prediction using deep neural networks. *Frontiers in Plant Science*, 10, 452963. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00621>
- Kirschbaum, M. U., & McMillan, A. M. (2018). Warming and elevated CO₂ have opposing influences on transpiration. Which is more important? *Current Forestry Reports*, 4, 51-71. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0073-8>
- Kocal, N., Sonnewald, U., & Sonnewald, S. (2008). Cell wall-bound invertase limits sucrose export and is involved in symptom development and inhibition of photosynthesis during compatible interaction between tomato and *Xanthomonas campestris* pv *vesicatoria*. *Plant Physiology*, 148(3), 1523-1536. <https://doi.org/10.1104/pp.108.127977>
- Kocira, A., Lamorska, J., Kornas, R., Nowosad, N., Tomaszewska, M., Leszczyńska, D., ... & Tabor, S. (2020). Changes in biochemistry and yield in response to biostimulants applied in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agronomy*, 10(2), 189. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020189>
- Koleva, L., Umar, A., Yasin, N. A., Shah, A. A., Siddiqui, M. H., Alamri, S., ... & Shabbir, Z. (2022). Iron oxide and silicon nanoparticles modulate mineral nutrient homeostasis and metabolism in cadmium-stressed *Phaseolus vulgaris*. *Frontiers in Plant Science*, 13, 806781. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.806781>
- Kumar, P., Kumar, T., Singh, S., Tuteja, N., Prasad, R., & Singh, J. (2020). Potassium: A key modulator for cell homeostasis. *Journal of Biotechnology*, 324, 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.10.018>

- La Bella, S., Consentino, B. B., Roupshael, Y., Ntatsi, G., De Pasquale, C., Iapichino, G., & Sabatino, L. (2021). Impact of *Ecklonia maxima* seaweed extract and Mo foliar treatments on biofortification, spinach yield, quality and NUE. *Plants*, *10*(6), 1139. <https://doi.org/10.3390/plants10061139>
- Le, V. N., Rui, Y., Gui, X., Li, X., Liu, S., & Han, Y. (2014). Uptake, transport, distribution and bio-effects of SiO₂ nanoparticles in Bt-transgenic cotton. *Journal of Nanobiotechnology*, *12*, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12951-014-0050-8>
- Li, Y., Xi, K., Liu, X., Han, S., Han, X., Li, G., ... & Zhu, Y. (2023). Silica nanoparticles promote wheat growth by mediating hormones and sugar metabolism. *Journal of Nanobiotechnology*, *21*(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01753-7>
- Mahmoud, A. W. M., Samy, M. M., Sany, H., Eid, R. R., Rashad, H. M., & Abdeldaym, E. A. (2022). Nanopotassium, nanosilicon, and biochar applications improve potato salt tolerance by modulating photosynthesis, water status, and biochemical constituents. *Sustainability*, *14*(2), 723. <https://doi.org/10.3390/su14020723>
- Mannino, G., Gentile, C., Ertani, A., Serio, G., & Berteza, C. M. (2021). Anthocyanins: Biosynthesis, distribution, ecological role, and use of biostimulants to increase their content in plant foods-A review. *Agriculture*, *11*(3), 212. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030212>
- Navarro-León, E., López-Moreno, F. J., Borda, E., Marín, C., Sierras, N., Blasco, B., & Ruiz, J. M. (2022). Effect of l-amino acid-based biostimulants on nitrogen use efficiency (NUE) in lettuce plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *102*(15), 7098-7106.
- Ning, D., Qin, A., Liu, Z., Duan, A., Xiao, J., Zhang, J., ... & Liu, Z. (2020). Silicon-mediated physiological and agronomic responses of maize to drought stress imposed at the vegetative and reproductive stages. *Agronomy*, *10*(8), 1136. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081136>
- Palacio-Márquez, A., Ramírez-Estrada, C. A., Gutiérrez-Ruelas, N. J., Sánchez, E., Ojeda-Barrios, D. L., Chávez-Mendoza, C., & Sida-Arreola, J. P. (2021). Efficiency of foliar application of zinc oxide nanoparticles versus zinc nitrate complexed with chitosan on nitrogen assimilation, photosynthetic activity, and production of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientia Horticulturae*, *288*, 110297. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110297>
- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E. A., & Nikolic, M. (2021). Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 697592. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Ponce-García, C. O., Soto-Parra, J. M., Sánchez, E., Muñoz-Márquez, E., Piña-Ramírez, F. J., Flores-Córdova, M. A., ... & Yáñez Muñoz, R. M. (2019). Efficiency of nanoparticle, sulfate, and zinc-chelate use on biomass, yield, and nitrogen assimilation in green beans. *Agronomy*, *9*(3), 128. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030128>
- Sánchez, E., Rivero, R. M., Ruiz, J. M., & Romero, L. (2004). Changes in biomass, enzymatic activity and protein concentration in roots and leaves of green bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Strike) under high NH₄NO₃ application rates. *Scientia horticulturae*, *99*(3-4), 237-248. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(03\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(03)00114-6)
- SAS Institute (2004). Statistical Analysis System. *User's Guide. Release 9.0*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Savvas, D., & Ntatsi, G. (2015). Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*, *196*, 66-81.
- Shahrajabian, M. H., Cheng, Q., & Sun, W. (2022). The effects of amino acids, phenols and protein hydrolysates as biostimulants on sustainable crop production and alleviated stress. *Recent Patents on Biotechnology*, *16*(4), 319-328.
- Simkin, A. J., Faralli, M., Ramamoorthy, S., & Lawson, T. (2020). Photosynthesis in non-foliar tissues: implications for yield. *The Plant Journal*, *101*(4), 1001-1015. <https://doi.org/10.1111/tpj.14633>
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., & Ahmad, P. (2021). Silicon and plants: current knowledge and future prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, *40*, 906-925. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>
- Tahir, M. A., Aziz, T., Farooq, M., & Sarwar, G. (2012). Silicon-induced changes in growth, ionic composition, water relations, chlorophyll contents and membrane permeability in two salt-stressed wheat genotypes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *58*(3), 247-256. <https://doi.org/10.1080/03650340.2010.518959>
- Uebersax, M. A., Cichy, K. A., Gomez, F. E., Porch, T. G., Heitholt, J., Osorno, J. M., ... & Bales, S. (2023). Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security-A review. *Legume Science*, *5*(1), e155.
- Verma, K. K., Zeng, Y., Song, X. P., Singh, M., Wu, K. C., Rajput, V. D., & Li, Y. R. (2022). Nanosilicon: An approach for abiotic stress mitigation and sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 1025974. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1025974>
- Vougeleka, V., Savvas, D., Ntatsi, G., Ellinas, G., Zacharis, A., Iannetta, P. P., ... & Saitanis, C. J. (2023). Impact of the rootstock genotype on the performance of grafted common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, *311*, 111821. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111821>
- Wang, X., Xie, H., Wang, P., & Yin, H. (2023). Nanoparticles in plants: Uptake, transport and physiological activity in leaf and root. *Materials*, *16*(8), 3097.
- Xie, Z., Song, F., Xu, H., Shao, H., & Song, R. (2014). Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. *The Scientific World Journal*, *2014*(1), 718716. <https://doi.org/10.1155/2014/718716>