

Uso de silicio y ácido salicílico en la tolerancia al estrés por déficit hídrico en plantas de fréjol

Silicon and salicylic acid application to enhance drought stress tolerance in common bean plants

- 1 Manuel Adrián Macao Pillco  <https://orcid.org/0009-0004-7157-0884>
Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, Ecuador. Maestría en Agronomía, mención Producción Vegetal
mmacao1@utmachala.edu.ec
- 2 Luis Felipe Lata Tenesaca  <https://orcid.org/0000-0002-6882-0035>
Universidad Técnica de Machala (UTMACH), Machala, Ecuador.
llata1@utmachala.edu.ec

Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 14/07/2026

Revisado: 16/08/2026

Aceptado: 30/09/2026

Publicado: 21/10/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v10i4.3784>

Cítese:

Macao Pillco, M. A., & Lata Tenesaca, L. F. (2026). Uso de silicio y ácido salicílico en la tolerancia al estrés por déficit hídrico en plantas de fréjol. *Ciencia Digital*, 10(4), 126-139. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v10i4.3784>

**Ciencia
Digital**
Editorial

CIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinaria, trimestral, que se publicará en soporte electrónico tiene como misión contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://cienciadigital.org>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec.

Esta revista está protegida bajo una licencia *Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 International*. Copia de la licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>.



Palabras claves: Déficit hídrico; elemento benéfico; estrés vegetal; hormona vegetal; phaseolus vulgaris.

Resumen: Introducción. El estrés hídrico generado por el cambio climático limita drásticamente la producción de alimentos y toda su cadena productiva así como la germinación, el crecimiento, el desarrollo fotosintético y la productividad del cultivo de fréjol. **Objetivo.** Evaluar los efectos de la aplicación de Silicio (Si) y Ácido Salicílico (AS) vía foliar y radicular, sobre la tolerancia al déficit hídrico en fréjol (*Phaseolus vulgaris* L. cv. 'INIAP 475 Belén'). **Metodología.** La investigación se realizó bajo invernadero, utilizando un diseño completamente al azar (DCA), con cinco tratamientos (T1: Control 30 % CC, T2: Si foliar, T3: Si radicular, T4: AS foliar y T5: AS + Si) y ocho repeticiones. El déficit hídrico al 30 % de capacidad de retención de agua se mantuvo mediante método gravimétrico. Se evaluaron variables morfológicas, fisiológicas (índice relativo de clorofila) y químicas del extracto de savia ($^{\circ}$ Brix, pH, CE, Na, K, Ca, NO_3^-). **Resultados.** Existieron diferencias significativas para la altura del tallo ($p < 0.001$), donde el Si radicular (T3) presentó la mayor respuesta (81.30 ± 3.97 cm). Todos los tratamientos superaron al control en el número de hojas y en el grosor del tallo, destacando el Si radicular (5.97 ± 0.25 cm) y la combinación AS + Si (4.92 ± 0.13 cm). En la caracterización química foliar, la combinación AS + Si incrementó en 118.8 % el contenido de potasio y 100 % el de calcio respecto al testigo. **Conclusión.** La aplicación radicular de silicio y su combinación con ácido salicílico promueven un mayor rendimiento fisiológico y nutricional, lo que se traduce en una mayor tolerancia al estrés hídrico fréjol Belén. **Área de estudio general:** Ciencias Agrícolas. **Área de estudio específica:** Fisiología vegetal. **Tipo de estudio:** Artículo original.

Keywords: Functional exercises; conditional physical capacities; EUROFIT battery; physical education; adolescents; high school.

Abstract: Introduction. Water stress generated by climate change drastically limits food production and its entire supply chain, as well as the germination, growth, photosynthetic development, and yield of bean crops. Objective. To evaluate the effects of foliar and root applications of silicon (Si) and salicylic acid (SA) on water deficit tolerance in beans (*Phaseolus vulgaris* L. cv. 'INIAP 475 Belén'). Methodology. The research was conducted in a greenhouse using a completely randomized design (CRD) with five treatments (T1: Control 30 % FC, T2: Foliar Si, T3: Root Si, T4: Foliar SA, and T5: SA + Si) and five replications. Water stress at 30 % field capacity was

maintained using the gravimetric method. Morphological, physiological (relative chlorophyll index), and plant extract chemical variables ($^{\circ}$ Brix, pH, EC, Na, K, Ca, NO_3^-) were evaluated. Results. Significant differences were observed for stem height ($p < 0.001$), where root Si (T3) exhibited the highest response (81.30 ± 3.97 cm). All treatments outperformed the control in leaf number and stem diameter, with root Si (5.97 ± 0.25 cm) and the SA + Si combination (4.92 ± 0.13 cm) showing the most notable results. In the foliar chemical characterization, the SA + Si combination increased potassium content by 118.8 % and calcium content by 100 % compared to the control. Conclusion. Root application of silicon and its combination with salicylic acid enhance physiological and nutritional performance, translating into greater water stress tolerance in Belén dry bean. General Area of Study: Agricultural Sciences. Specific area of study: Plant physiology. Type of study: Original article.

1. Introducción

El fréjol es un cultivo de gran importancia por su aporte de proteínas vegetales, fibra, vitaminas y minerales, así como por su contribución a la seguridad alimentaria y a la economía de los pequeños productores (Martínez, 2025). Sin embargo, su producción puede verse afectada por eventos asociados al cambio climático, como sequías e inundaciones, que limitan el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Valladolid, 2020). Entre estos factores, el déficit hídrico constituye una de las principales restricciones, ya que ocurre cuando la pérdida de agua por transpiración supera la capacidad de absorción de las raíces. Esta condición, favorecida por la baja disponibilidad de agua, las altas temperaturas o la salinidad del suelo, puede reducir la germinación, el crecimiento, la fotosíntesis y, en consecuencia, el ren-

dimiento del cultivo (Estrada et al., 2016).

El desarrollo de estrategias que permitan aumentar la tolerancia de las plantas frente a períodos prolongados de déficit hídrico se ha convertido en una alternativa importante para reducir las pérdidas de productividad asociadas a la sequía. Entre estas estrategias destaca el uso de bioestimulantes y de diversos compuestos orgánicos e inorgánicos capaces de favorecer el crecimiento y mejorar la respuesta fisiológica de las plantas bajo condiciones de estrés. Estos productos pueden contribuir al mantenimiento del estado hídrico, la actividad fotosintética, el equilibrio osmótico, la eficiencia en el uso de nutrientes y la activación de mecanismos antioxidantes, lo que permite disminuir el daño celular causado por la escasez de agua (Anchondo-Páez et al., 2024).

El Silicio (Si) ha sido ampliamente estudia-

do por su capacidad para mejorar la respuesta de las plantas frente a condiciones de estrés biótico y abiótico. Aunque no se considera un elemento esencial para la mayoría de las especies vegetales, su aplicación puede favorecer procesos fisiológicos relacionados con la actividad antioxidante, la fotosíntesis, la absorción y el uso eficiente de nutrientes, así como con el mantenimiento de la integridad estructural de los tejidos (Hernández-Figueroa et al., 2022). Estos efectos pueden traducirse en mejoras en variables de crecimiento, como altura y diámetro de planta, además de favorecer procesos reproductivos como floración y fructificación. Parte de estas respuestas se atribuye a que el Si contribuye a reducir los efectos negativos provocados por diferentes condiciones de estrés, permitiendo un mejor desempeño fisiológico y productivo de las plantas (Cárdenas et al., 2014).

El Ácido Salicílico (AS), por su parte, es una molécula señalizadora que participa en la regulación de diversos procesos fisiológicos y de defensa vegetal, entre ellos el crecimiento radical, la absorción de nutrientes, la floración y la respuesta frente a patógenos y factores de estrés. Diversos estudios han demostrado que su aplicación exógena puede favorecer el crecimiento, el enraizamiento y el rendimiento de diferentes especies vegetales (Vázquez et al., 2016). Bajo condiciones de déficit hídrico, el AS puede contribuir al mantenimiento de la actividad fotosintética, las relaciones hídricas y el metabolismo de nutrientes, además de fortalecer los sistemas antioxidantes, reducir el daño oxidativo y preservar la estabilidad de

las membranas celulares. Estas respuestas pueden favorecer la acumulación de biomasa y aumentar la capacidad de la planta para tolerar períodos de limitada disponibilidad de agua (Bezerra et al., 2020). et al. (2020) identificaron avances en flexibilidad y fuerza abdominal; y Barrera & Mayorga (2026) informaron efectos positivos en estudiantes de bachillerato ecuatorianos. Estas evidencias justifican examinar la respuesta en un contexto escolar específico mediante mediciones estandarizadas, evitando asumir que todas las capacidades responden con igual magnitud.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos de la aplicación de silicio y ácido salicílico como posibles inductores de tolerancia al déficit hídrico en plantas de fréjol (L. cv. 'INIAP 475 Belén'), mediante el análisis de variables relacionadas con el crecimiento y la respuesta fisiológica de las plantas bajo condiciones de disponibilidad limitada de agua.

2. Metodología

Para el cumplir el objetivo, la metodología más sólida fue un experimento factorial bajo condiciones controladas, con déficit hídrico como factor principal y Si y AS como factores de tratamiento, diferenciando además la vía de aplicación (foliar vs. radicular). Esto permitiría evaluar tanto los efectos individuales como las interacciones entre los tratamientos. Se propone una investigación experimental, cuantitativa y explicativa, bajo condiciones de invernadero. El diseño se estructuró como un Diseño Completamen-

te al Azar (DCA) con arreglo factorial, en condiciones ambientales homogéneas.

2.1 Área de estudio

Las plantas se cultivaron en un invernadero de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala, bajo las siguientes condiciones: temperatura de 25 ± 5 °C, humedad relativa de 70 ± 5 % y Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA) natural de 900 ± 15 μmol fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, medida al mediodía, y se regaron según fuera necesario.

2.2 Material vegetal

Se utilizó el fréjol variedad Belén (Phaseolus vulgaris L. cv. 'INIAP 475 Belén') una planta leguminosa de alta importancia económica en el Ecuador. Para el estudio se sembraron cinco semillas por maceta en un sustrato de textura franco limosa, pH(KCl) de 6,8 y conductividad eléctrica de 0,9 dS m^{-1} en macetas de 3 dm³. A los ocho días después de la siembra se realizó un raleo manual para obtener dos plantas uniformes como unidad experimental. La nutrición mineral se mantuvo uniforme en todos los tratamientos mediante un fertilizante edáfico con 16 % N, 11 % P, 24 % K, 2,5 % S, 2,5 % Ca y 1,5 % Mg, aplicado a razón de 25 g planta^{-1} cada 15 días.

2.3 Tratamientos y diseño experimental

Se empleó un Diseño Completamente Al Azar (DCA), con cinco tratamientos y ocho repeticiones, con un total de 40 unidades experimentales (**Tabla 1**).

Tabla 1: Descripción de tratamientos aplicados en la investigación

Tratamiento	Descripción del tratamiento
T1	Riego al 30 % de Capacidad de retención de agua (CRA).
T2	Riego al 30 % de CRA + aplicación de silicio foliar (Si).
T3	Riego al 30 % de CRA + aplicación de silicio radicular (Si).
T4	Riego al 30 % de CRA + aplicación de ácido salicílico (AS).
T5	Riego al 30 % de CRA + aplicación combinada de Si y AS.

Nota: elaborado con base en el diseño experimental.

Para determinar la capacidad de retención de agua del sustrato se utilizó el método gravimétrico. Se registró el peso del suelo seco en cada maceta (Pseco), después se saturó con agua y se cubrió la superficie con papel aluminio para evitar la evapotranspiración directa. Tras 48 horas de drenaje libre se registró el peso del suelo a capacidad de campo (PCC) y el porcentaje de humedad de cálculo mediante la Ecuación 1:

$$\%CC = \left(\frac{PCC - Pseco}{Pseco} \right) \times 100 \quad (1)$$

El mantenimiento del déficit hídrico al 30 % de CRA se controló mediante pesajes diarios de las macetas y reposición gravimétrica del agua consumida.

2.4 Aplicación de los tratamientos

El silicio se suministró vía radicular (drench) a una concentración de 1,5 mL/L de agua, el ácido salicílico y el silicio (fo-

liar) se suministraron por aspersión a una dosis de 0,5 ml/l de agua. Para el tratamiento combinado de silicio y ácido salicílico, se aplicó de manera simultánea vía radicular y vía foliar respectivamente, ajustando el pH de las soluciones para que se encontrara entre 6,0 y 7,0 utilizando un pHmetro digital. Se aplicaron los tratamientos cada 3 días durante toda su etapa vegetativa.

2.5 Variables evaluadas

Se midieron las variables morfológicas, fisiológicas y fisicoquímicas de las plantas. Las variables fisiológicas y morfológicas que se midieron fue la altura del tallo, diámetro del tallo, número de hojas e índice relativo de clorofila. El índice relativo de clorofila se determinó en las hojas tres y cuatro mediante un medidor portátil Atleaf CHL STD con precisión de -0,6 a +0,5 unidades atLeaf. Las lecturas se efectuaron en una región foliar equivalente entre plantas y se evitó la nervadura central.

Se realizó la evaluación del extracto de savia vegetal determinándose el contenido de sólidos solubles totales ($^{\circ}\text{Brix}$), sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), nitratos (NO_3^-), Conductividad Eléctrica (CE) y pH. Estas variables fueron obtenidas mediante medidores portátiles HORIBA LAQUATwin. La conductividad eléctrica se expresó en mS cm^{-1} , mientras que las concentraciones de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y NO_3^- se expresaron en ppm.

Se obtuvo la savia vegetal a partir del tejido foliar de las plantas evaluadas, procurando mantener un procedimiento uniforme para

todos los tratamientos.

2.6 Análisis estadístico

El análisis de varianza se realizó mediante el software estadístico InfoStat (versión 2020). Se verificaron los supuestos del modelo paramétrico. La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk ($p < 0.05$), mientras que la homocedasticidad u homogeneidad de varianzas entre tratamientos se comprobó mediante la prueba de Levene ($p < 0.05$). Posteriormente, se realizó el análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño completamente al azar. En los casos donde se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$), se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey con un nivel de significancia del 5 % ($\alpha = 0.05$). Para los resultados que no cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis utilizando un nivel de significancia de ($\alpha = 0.05$).

3. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos tras evaluar el efecto de la aplicación de silicio (Si) y Ácido Salicílico (AS) sobre el desarrollo de plantas de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L. cv. 'INIAP 475 Belén') bajo condiciones controladas de estrés hídrico. Los resultados se estructuran empezando por los parámetros morfofisiológicos (como la altura, el grosor del tallo, el número de hojas), índice de clorofila y finalizando con el perfil nutricional destacando las diferencias estadísticas encontradas entre los tratamientos

evaluados y el grupo control.

3.1 Altura el tallo

El análisis de varianza (ANOVA) para los tratamientos de la variedad belén reveló diferencias significativas entre las aplicaciones de los tratamientos evaluados para la altura del tallo ($p < 0,001$) (**Figura 1**).

El tratamiento con Si aplicado vía radicular (Si Radicular) demostró una mejor respuesta en el crecimiento de las plantas, alcanzando un promedio de $81,30 \pm 3,97$ cm (**Figura 1**). Este tratamiento se ubicó en el grupo estadístico (a) de la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), superando de manera significativa a todas las demás alternativas evaluadas y al control.

3.2 Número hojas

En el análisis de varianza (ANOVA) del frejol belén se reveló diferencias significativas entre las aplicaciones de los tratamientos evaluadas para el número de hojas ($p < 0,001$) (**Figura 2**).

Las aplicaciones de silicio y ácido salicílico en todos los tratamientos incrementaron el número de hojas en la variedad frejol belén en comparación con el control. Si (Radicular) ($9,90 \pm 0,46$), AS ($8,78 \pm 0,48$) y AS + Si ($8,50 \pm 0,46$) presentaron los valores más elevados en cuanto al número de hojas siendo el Si (Foliar) el que tenía mejor resultado, conformando el grupo estadístico “a”, sin observarse diferencias significativas entre los tratamientos. Por otro lado, el Control registró el valor más bajo ($6,25 \pm 0,51$),

mostrando un menor desempeño en comparación con los tratamientos evaluados.

3.3 Diámetro del tallo

No se cumplió la prueba de homocedasticidad de los residuos ($p = 0.0024$), el diámetro del tallo fue evaluado mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. La comparación por pares mostró que el tratamiento con Si (Radicular) presentó el mayor grosor del tallo (5.97 ± 0.25 cm), seguido de la combinación AS + Si, con 4.92 ± 0.13 cm. Los dos tratamientos se ubicaron en el grupo estadístico (B), mientras que los demás tratamientos registraron los menores valores de grosor del tallo (**Tabla 2**).

3.4 Índice de clorofila

La prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos en relación con el índice de clorofila ($H = 20.36$; $p = 0.0004$). En la comparación por pares, el control registró los valores más altos (19.29 ± 2.81 ; mediana = 18.90), en comparación con el resto de tratamientos y perteneciendo al grupo estadístico (B). Por otro lado, los otros tratamientos se agruparon en la categoría estadística (A), sin presentar diferencias significativas entre ellos (**Tabla 3**).

3.5 Índice de clorofila

La prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos en relación con el índice de clorofila ($H = 20.36$; $p = 0.0004$). En la comparación por pares, el control re-

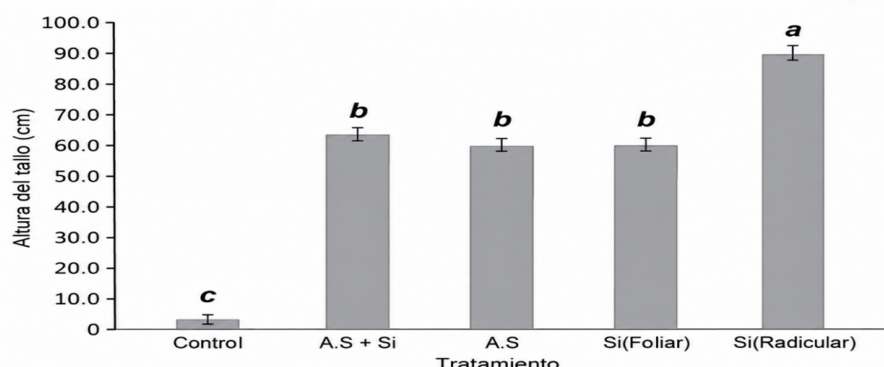


Figura 1: Efecto de los tratamientos sobre la altura del tallo (cm) en frejol belén

Nota: Los datos representan la media $\pm$ error estándar. Letras diferentes encima las barras indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

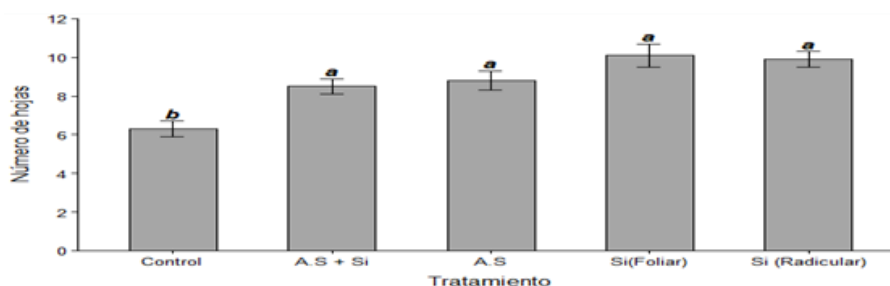


Figura 2: Número de hojas

Nota: Los datos representan la media $\pm$ error estándar. Letras diferentes encima las barras indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

gistró los valores más altos (19.29 ± 2.81 ; mediana = 18.90), en comparación con el resto de tratamientos y perteneciendo al grupo estadístico (B). Por otro lado, los otros tratamientos se agruparon en la categoría estadística (A), sin presentar diferencias significativas entre ellos (Tabla 3).

3.6 Variables químicas

El contenido de sólidos solubles $^{\circ}\text{Brix}$, presentó valores entre 5.2 y 9.8. El Ácido Salicílico (AS) registró el valor más alto (9.8 $^{\circ}\text{Brix}$), seguido por AS + Si (5.9 $^{\circ}\text{Brix}$) y el control (5.7 $^{\circ}\text{Brix}$), mientras que el tratamiento con Si foliar presentó el valor más

bajo (5.2 $^{\circ}\text{Brix}$).

En cuanto a la concentración de Sodio (Na), los valores oscilaron entre 110 y 260 ppm. El control presentó la mayor concentración (260 ppm), seguido de Si foliar (190 ppm), AS (140 ppm) y AS + Si (110 ppm). Para el Potasio (K), los resultados variaron de 1600 a 3500 ppm, observándose el valor más elevado en el tratamiento AS + Si (3500 ppm), seguido de AS (2500 ppm), Si foliar (2200 ppm) y el control (1600 ppm).

Los resultados de la concentración de Calcio (Ca) presentaron valores entre 1400 y 2800 ppm. El tratamiento AS + Si registró una

Tabla 2: Respuesta del grosor del tallo en fréjol belén ante aplicaciones de silicio y ácido salicílico

Tratamiento	n	Media (cm)	Desviación Estándar (DE)	Mediana	Promedio de Rangos	Grupo ($\alpha = 0,05$)
Si (Radicular)	10	5,97	0,25	6,01	41,50	B
AS + Si	10	4,92	0,13	4,92	29,75	B
Si (Foliar)	9	4,67	0,07	4,66	16,00	A
AS	9	4,66	0,09	4,65	14,11	A
Control	8	4,63	0,07	4,66	12,19	A

Nota: Las letras diferentes en la columna “Grupo” indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis ($H = 33.05$; $p < 0.0001$). DE: desviación estándar.

Tabla 3: Efecto de las aplicaciones de silicio y ácido salicílico sobre el índice de clorofila en fréjol belén

Tratamiento	n	Media	Mediana	Desviación Estándar (DE)	Promedio de Rangos	Grupo ($\alpha = 0,05$)
Control	8	19,29	18,90	2,81	40,56	B
Si (Foliar)	9	11,09	10,20	2,56	25,67	A
Si (Radicular)	10	10,41	10,55	1,60	23,20	A
AS + Si	10	11,23	8,00	7,06	17,20	A

Nota: n: número de repeticiones utilizadas en cada tratamiento; DE: desviación estándar. Las letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple por pares de Kruskal-Wallis ($H = 20.36$; $p = 0.0004$).

concentración más alta (2800 ppm), seguido de AS (2100 ppm) y Si foliar (1800 ppm), mientras que el control presentó el valor más bajo (1400 ppm). Con los Nitratos (NO_3^-), las concentraciones oscilaron entre 47 y 72 ppm. El tratamiento AS + Si presentó la mayor concentración (72 ppm), seguido de Si foliar (60 ppm) y el control (59 ppm), mientras que AS presentó el menor valor (47 ppm).

La Conductividad Eléctrica (CE) presentó valores de 4.24 a 9.26 mS/cm. AS + Si mostró la mayor conductividad eléctrica (9.26 mS/cm), seguido de Si foliar (8.71 mS/cm) y AS (8.67 mS/cm), mientras que el control presentó el menor valor (4.24 mS/cm). Finalmente, el pH presentó valo-

res entre 5.5 y 6.2. El tratamiento control registró el valor más alto (6.2), seguido de Si foliar (5.9), AS + Si (5.7) y AS (5.5) (Tabla 4).

4. Discusión

El silicio aplicado vía radicular mediante Drench promovió una mayor altura del tallo y mostró diferencias estadísticas respecto a los demás tratamientos. Esta respuesta podría estar asociada con la capacidad del Si para favorecer el desarrollo del sistema radical, mejorar la absorción de agua y contribuir al mantenimiento del estado hídrico de las plantas bajo condiciones de déficit. En este sentido, Llerena et al. (2025) señalaron que aplicaciones progresivas de Si pueden

Tabla 4: Caracterización química del extracto de clorofila en la planta de fréjol belén bajo la aplicación de silicio y ácido salicílico

Tratamiento	°Brix	Na (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	CE (mS/cm)	pH
Control	5,7	260	1600	1400	59	4,24	6,2
AS + Si	5,9	110	3500	2800	72	9,26	5,7
AS	9,8	140	2500	2100	47	8,67	5,5
Si (Radicular)*	—	—	—	—	—	—	—
Si (Foliar)	5,2	190	2200	1800	60	8,71	5,9

Nota: Los datos corresponden a valores absolutos obtenidos de muestras compuestas foliares por tratamiento (n = 1). AS: ácido salicílico; Si: silicio; CE: conductividad eléctrica.

estimular significativamente el crecimiento vegetal, lo que respalda la respuesta observada en el presente estudio. Asimismo, los tratamientos que incluyeron Ácido Salicílico (AS) presentaron mayores valores de altura del tallo en comparación con el control. El AS actúa como una molécula señalizadora involucrada en la regulación del crecimiento, la fotosíntesis y diversas respuestas adaptativas frente al estrés. A nivel fisiológico y molecular, participa en la modulación del equilibrio hormonal, la regulación del metabolismo antioxidante y la activación de mecanismos de defensa, incluida la Resistencia Sistémica Adquirida (SAR), contribuyendo así a mantener el crecimiento de las plantas bajo condiciones adversas (Rodríguez et al., 2017).

En el número de hojas, todos los tratamientos superaron al control, destacándose la aplicación foliar de Si, seguida de la aplicación radicular. Esta respuesta sugiere que el Si favoreció el desarrollo foliar y contribuyó al mantenimiento del crecimiento vegetativo. Resultados similares fueron reportados por Cázarez et al. (2023) quienes observaron un incremento en el número de hojas tras la aplicación de silicio, asociado con

una mayor expansión del área foliar y una mejor capacidad fotosintética del cultivo.

En cuanto al diámetro del tallo, la aplicación radicular de Si presentó la mayor respuesta respecto al control, seguida del tratamiento combinado con ácido salicílico y silicio. Este comportamiento coincide con lo señalado por Vega et al. (2026) quienes registraron incrementos de hasta 7 % en el diámetro del tallo de plantas de tomate tratadas con silicio. De manera similar, Díaz & Rodríguez (2016) reportaron que la aplicación de ácido salicílico favoreció el engrosamiento del tallo, lo que evidencia su posible participación en la promoción del crecimiento y desarrollo estructural de la planta.

La aplicación de silicio puede favorecer la acumulación y estabilidad de los pigmentos fotosintéticos al contribuir a la protección de las membranas tilacoidales y reducir la degradación fotooxidativa de la clorofila. Sin embargo, en el presente estudio el tratamiento control presentó el mayor índice de clorofila, lo que sugiere que la respuesta al Si no fue uniforme bajo las condiciones evaluadas. Esta diferencia podría estar asociada con factores como el estado fisiológico de

las plantas al momento de la evaluación, la concentración utilizada, la vía de aplicación o la intensidad del estrés impuesto. Resultados previos han señalado que el Si puede favorecer la conservación de los pigmentos fotosintéticos bajo determinadas condiciones de estrés (Cázarez-Flores et al., 2024).

En la caracterización química de los tratamientos, la combinación de ácido salicílico y silicio (AS+Si) presentó el perfil nutricional más favorable, con mayores concentraciones de calcio y potasio, elementos estrechamente relacionados con el mantenimiento de la integridad celular, la regulación osmótica y el funcionamiento fisiológico de la planta. Estos resultados son consistentes con lo señalado por Hernández (2022) quien reportó que formulaciones a base de Si contribuyeron a preservar el desempeño fotosintético bajo condiciones de déficit hídrico. De manera complementaria, Nava et al. (2025) indicaron que la aplicación de ácido salicílico favorece el desarrollo vegetativo y puede contribuir a un mejor estado metabólico de las plantas.

Bajo condiciones de déficit hídrico, el silicio puede contribuir a reducir las pérdidas de agua al favorecer la deposición de Si en tejidos epidérmicos y mejorar las relaciones hídricas de la planta. Por su parte, el ácido salicílico actúa principalmente como molécula señalizadora del estrés, modulando la respuesta estomática, el ajuste osmótico y la acumulación de compuestos compatibles, como azúcares solubles y prolina. Además, puede fortalecer el sistema antioxidante mediante la activación de enzimas

como Superóxido Dismutasa (SOD), Catalasa (CAT) y Ascorbato Peroxidasa (APX), disminuyendo el daño oxidativo sobre membranas celulares. En conjunto, la aplicación de Si y AS puede contribuir al mantenimiento de la homeostasis fisiológica y metabólica, favoreciendo la tolerancia de las plantas frente a condiciones de limitada disponibilidad de agua.

5. Conclusiones

- Los resultados obtenidos evidenciaron que los tratamientos con Ácido Salicílico (AS) y Silicio (Si) favorecieron el desempeño de las plantas en comparación con el control. Entre ellos, la aplicación radicular de Si presentó la respuesta más favorable en las variables de crecimiento, con mayores valores de altura del tallo, número de hojas y diámetro del tallo. Por su parte, la aplicación combinada de Si + AS produjo respuestas diferenciadas en las variables fisicoquímicas y se destacó por presentar mayores concentraciones de nutrientes minerales, principalmente K^+ , Ca^{2+} y NO_3^- . En conjunto, estos resultados indican que la aplicación de Si, particularmente por vía radicular, favoreció el crecimiento vegetativo, mientras que su combinación con AS estuvo asociada con una respuesta nutricional más favorable bajo las condiciones evaluadas.

6. Conflicto de Intereses

El autor declara no tener conflictos de intereses que puedan haber influido en el diseño, ejecución, análisis o interpretación de los resultados.

7. Derechos de autor (copyright)

Los autores son los titulares de los derechos de autor (patrimoniales y/o de explotación) de los contenidos de la revista (copyright).

8. Declaración de contribución de los autores

Los autores declaran haber participado de manera equitativa y sustancial en la realización de esta investigación, bajo las responsabilidades según la Taxonomía CRediT para describir las contribuciones individuales de cada autor al trabajo. Manuel Adrián Macao Pillco realizó la conceptualización de la investigación, organización y ejecución del ensayo, recopilación y curación de los datos, revisión del análisis estadístico, interpretación de los resultados, elaboración del borrador original, preparación de tablas y figuras, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito. Luis Felipe Lata Tenesaca realizó la supervisión académica y metodológica de la investigación, brindó orientación durante el desarrollo del ensayo, revisó el análisis y la interpretación de los resultados, efectuó la revisión crítica del manuscrito, realizó la corrección científica y académica y aprobó la versión final para su publicación.

8.1 Divulgación de la delegación a la IA generativa

La responsabilidad del manuscrito final recae íntegramente en el autor. Las herramientas de IA generativa no figuran como autores y no asumen responsabilidad por los resultados finales. Declaración presentada por: Manuel Adrian Macao Pillco.

9. Costos de financiamiento

El manuscrito no reporta financiamiento externo específico para la ejecución del estudio.

10. References

- Anchondo-Páez, J. C., Sánchez-Chávez, E., Ramirez-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. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1885>
- Bezerra de Carvalho, J. S., Ramos da Silva, J. P., & Monteiro Batista, R. d. (2020). Uso do ácido salicílico como atenuador aos efeitos do déficit hídrico em plantas de manjeriço. *Diversitas Journal*, 5(3), 1561-1574. <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v5i3-888>

- Cárdenas Cágal, Á., García Pestaña, J. D., Delgado Blancas, M. I., & Gutiérrez Rivera, B. (2014). Efecto de diferentes concentraciones de Silicio, adicionado al suelo en el cultivo de Chile Habanero a cielo abierto. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 2(1), 156-159. <https://doi.org/10.47808/revistabiogro.v2i1.280>
- Cázarez Flores, L. L., Angulo Castro, A., Vega Gutiérrez, T. A., Ayala Tafoya, F., & Aguilar-Quinonez, J. (2023). Producción de tomate en respuesta a dosis de silicio. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(3). <https://doi.org/10.19136/era.a10n3.3851>
- Cázarez-Flores, L. L., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T. de J., Zazueta-Torres, N. D., Yáñez-Juárez, M. G., Angulo-Castro, A., & Díaz-Valdés, T. (2024). Respuesta de dos variedades de pepino (*Cucumis sativus* L.) al silicio y cloro aplicados en casa sombra. *Terra Latinoamericana*, 42. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1620>
- Díaz, G., & Rodríguez, G. (2016). Efecto de la aplicación de tres bioestimulantes sobre el desarrollo y productividad en plantas de guayaba (*Psidium guajava* L.) 'Cubana Roja'. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 42(1). https://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_agro/article/view/11187
- Estrada Prado, W., Jerez Mompie, E., Nápoles García, M. C., Sosa Rodríguez, A., Maceo Ramos, Y. C., & Cordoví Dominguez, C. (2016). Respuesta de cultivares de frijol (*phaseolus vulgaris* L.) a la sequía utilizando diferentes índices de selección. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 79-84. <https://www.redalyc.org/journal/1932/193246976009/>
- Hernández Figueroa, K. I. (2022). Respuestas fisiológicas y bioquímicas a la aplicación foliar de bioestimulantes en plantas de frijol ejotero sometidas a estrés hídrico [Tesis de maestría, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C, México]. <https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1006/1348>
- Hernández-Figueroa, K. I., Sánchez-Chávez, E., Ojeda-Barrios, D. L., Chávez-Mendoza, C., & Muñoz-Márquez, E. (2022). Efectividad a la aplicación de bioestimulantes en frijol ejotero bajo estrés hídrico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(28), 149-160. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3270>
- Llerena Ramos, L. T., Reyes Pérez, J. J., Castro Klinger, E. V., Torres-Rodríguez, J. A., Rodríguez Rodríguez, S., & Sariñana Navarrete, M. de L. A. (2025). Parámetros agroproductivos y valor nutricional en plantas de cacahuete en respuesta a la bioestimulación con silicio. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 28(2), 72. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6232>
- CMartínez, J. C. (2025). El frijol lima (*Phaseolus lunatus* L.) en America: caracte-

- terísticas, origen e importancia de la especie. En el libro “El fréjol torta o pallar (2da Edición)”. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=Q9FV0cAAAJ&cstart=100&pagesize=100&citation_for_view=Q9FV0cAAAAAJ:Aul-kaQHnToC
- Nava Alejo, E., Apáez Barrios, P., Álvarez Hernández, J. C., Díaz Nájera, J. F., Raya Montaña, Y. A., & Apáez Barrios, M. (2025). Producción de jitomate con aplicación de ácido salicílico y algas marinas bajo malla sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(2), e3538. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i2.3538>
- Rodríguez Larramendi, L. A., González Ramírez, M., Gómez Rincón, M. A., Guevara Hernández, F., Salas Marina, M. A., & Gordillo Curiel, A. (2017). Efectos del ácido salicílico en la germinación y crecimiento inicial de plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 34, 253-269. https://www.researchgate.net/profile/Luis-Alfredo-Larramendi/publication/318583397_Effects_of_salicylic_acid_on_the_germination_and_initial_growth_of_bean_seedlings_Phaseolus_vulgaris_L/links/5b9f297b45851574f7d1843c/Effects-of-salicylic-acid-on-the-germination-and-initial-growth-of-bean-seedlings-Phaseolus-vulgaris-L.pdf
- Valladolid Salinas, E. H. (2020). Diversidad morfológica del fréjol (*Phaseolus* sp. y *Vigna* sp.) distribuido en el sur de Ecuador: implicaciones para su conservación, como resiliencia al cambio climático y para la seguridad alimentaria [Tesis de grado, Universidad Técnica Particular de Loja]. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/26462>
- Vázquez Díaz, D. A., Salas Pérez, L., Preciado Rangel, P., Segura Castruita, M. A., González Fuentes, J. A., & Valenzuela-García, J. R. (2016). Efecto del ácido salicílico en la producción y calidad nutraceutica de frutos de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 17, 3405-3414. <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263149506002.pdf>
- Vega Gutiérrez, T. A., Yáñez Juárez, M. G., Tirado Ramírez, M. A., Cázarez Flores, L. L., Mendoza Gómez, A., & González Balcázar, A. (2026). Silicio para mejorar la calidad de plántulas de melón (*Cucumis melo* L.) y pepino (*Cucumis sativus* L.). *Bioagro*, 38(1), 533-542. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10525344>