

EVALUACIÓN DEL APOORTE DE SILICIO EN LA RESPUESTA *de Vitis vinifera* A LA SALINIDAD

La salinidad representa una seria amenaza para la viticultura, siendo la mayoría de los cultivares considerados moderadamente sensibles a esta condición adversa. En este estudio, plantas jóvenes de 'castellana negra' fueron sometidas a estrés salino durante 75 días y tratadas con silicio (Si) para evaluar su potencial en la mitigación de los efectos del estrés por NaCl. En general, los datos sugieren que el silicio podría mejorar la resiliencia de la vid al estrés por salinidad al regular las respuestas fisiológicas al estrés.

JALEL MAHOUCI*, ANTONIO URBANO-GÁLVEZ

Departamento de Ingeniería Agraria y del Medio Natural, Universidad de La Laguna. Tenerife

*Correspondencia: jmahou@ull.edu.es

La salinidad es una de las amenazas ambientales más importantes para la productividad agrícola a nivel mundial, especialmente en regiones áridas y semiáridas. Las altas concentraciones de iones salinos interrumpen el crecimiento y desarrollo de las plantas, provocando una disminución tanto del rendimiento como de la calidad de los cultivos. Para hacer frente al impacto de la salinidad, las plantas activan las vías de señalización del estrés salino para mitigar los efectos nocivos del exceso de Na⁺ y otros iones. En este sentido, la presencia de Ca²⁺ y fitohormonas, como el ácido abscísico (ABA), el etileno y el ácido salicílico (SA), desencadena una cascada de reacciones de transducción de señales que facilitan la adaptación de la planta a las condiciones salinas. Por lo tanto, se ha demostrado que los genotipos de vid con mayor tolerancia al estrés salino acumulan mayores niveles de ABA en dichas condiciones. Además, se ha reportado que las vides que acumulan mayores cantidades de prolina y azúcares solubles presentan una

menor inhibición del crecimiento y mayores concentraciones foliares de clorofilas y carotenoides. En la vid, la síntesis de ABA en respuesta al estrés hídrico desempeña un papel clave en la regulación de la respuesta estomática, preservando el agua en las hojas y promoviendo el crecimiento celular. Por otro lado, el SA actúa como una molécula de señalización en las plantas, afectando las respuestas a la salinidad mediante la regulación del crecimiento, la fotosíntesis y la absorción de iones. En particular, en la vid, el SA puede ayudar a contrarrestar los efectos adversos de la salinidad al reducir la acumulación de iones tóxicos y mejorar la absorción de nutrientes esenciales. Además, se ha demostrado que la aplicación de SA mitiga los impactos adversos del estrés salino en la fotosíntesis y el crecimiento. Para mitigar los efectos de la salinidad en el desarrollo y la producción de los cultivos, se ha estudiado ampliamente el papel del Si en la mejora de la respuesta de las plantas al estrés salino en diversas especies. Además, la disminución de la absorción de Na⁺ y la preservación de la relación óptima

K⁺/Na⁺ inducida por el Si desempeñan un papel importante en la tolerancia de las plantas a la sal. En este contexto, el K⁺ es el soluto inorgánico clave que regula la turgencia de las células y la apertura estomática. La salinidad también disminuye la absorción de K⁺ y Ca²⁺ debido al aumento de los niveles de Na⁺, pero el Si puede contrarrestar este efecto al aumentar los niveles de K⁺ y Ca²⁺. En plantas jóvenes de vid 'Cabernet Sauvignon', el estrés salino aumenta el Na⁺ foliar; sin embargo, la adición de Si disminuye su nivel. De igual manera, el Si induce el secuestro de Na⁺ en las vacuolas, regulando su acumulación en los cloroplastos. Asimismo, la suplementación con Si mejora la relación K⁺/Na⁺, la concentración iónica y el balance de nutrientes. Este estudio tiene como objetivo dilucidar la efectividad de la aplicación de Si exógeno para mitigar el estrés salino en plantas jóvenes de vid 'castellana negra', centrándose en las fitohormonas, la dinámica de los nutrientes minerales y los atributos fisiológicos relacionados con la resiliencia al estrés.

Metodología

Las plantas de vid 'castellana negra' se reprodujeron a partir de esquejes recolectados de brotes podados en viñedos de la Universidad de La Laguna. Las plantas se cultivaron en invernadero, en macetas de plástico de 5 L con sustrato enriquecido con fertilizante granulado (ProTurf®, fertilizante de N, P, K con Ca y Mg: 12-5-20 + 2 CaO + MgO) antes del inicio del experimento. Al cumplir un año, se podaron para conservar de 2 a 3 yemas en cada uno de los dos brotes por planta.

En el sistema experimental, las plantas se distribuyeron aleatoriamente en cuatro bloques, con 16 plantas por tratamiento. Los tratamientos se aplicaron de la siguiente manera: a) control: plantas regadas con agua convencional; b) estrés por NaCl: plantas regadas con una solución de NaCl 90 mM y c) estrés por NaCl + silicio (Si (10 mM), aplicado como silicato de calcio mediante riego) durante cuatro semanas (un tratamiento de Si por semana) desde el inicio del experimento. El riego de todas las plantas con agua salina y no salina se realizó proporcionando a cada planta una media de 1 L de agua, tres veces por semana, durante un período de 75 días.

Para evaluar el crecimiento de las plantas, se midió el peso fresco de todas las hojas funcionales por planta al finalizar el ensayo. Posteriormente, se congelaron en nitrógeno líquido, se liofilizaron o almacenaron a -80°C muestras de hojas de al menos cuatro plantas por tratamiento para su posterior análisis.

Para el análisis de pigmentos fotosintéticos, fitohormonas, elementos minerales, así como de análisis estadísticos se siguieron los protocolos descritos en Urbano *et al.* (2025).

Resultados y discusión

El crecimiento vegetativo se evaluó mediante el peso fresco foliar obtenido del total de hojas funcionales por planta, colectadas al final del período experimental (Figura 1). Los datos indicaron que las condiciones

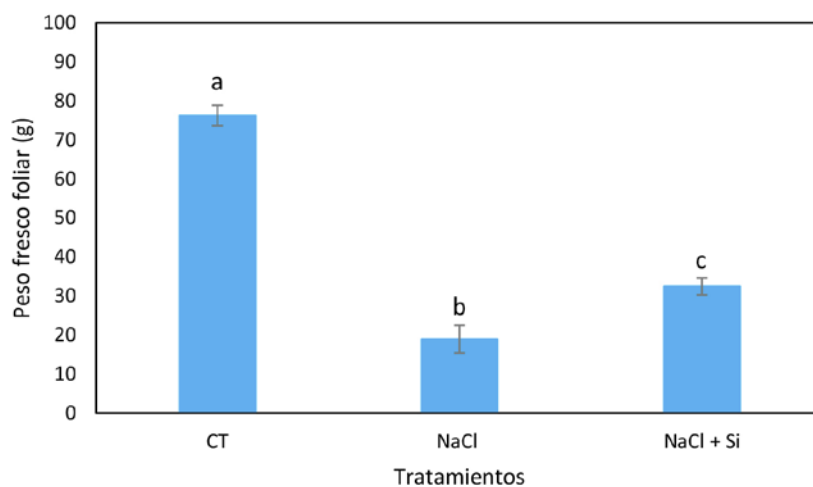


FIGURA 1

Peso fresco de hojas por planta procedentes de plantas control, plantas tratadas con NaCl y plantas tratadas con NaCl + Si. En cada tratamiento los valores (medias $\pm$ error estándar) seguidos de letras distintas representan diferencias significativas ($P < 0,05$).

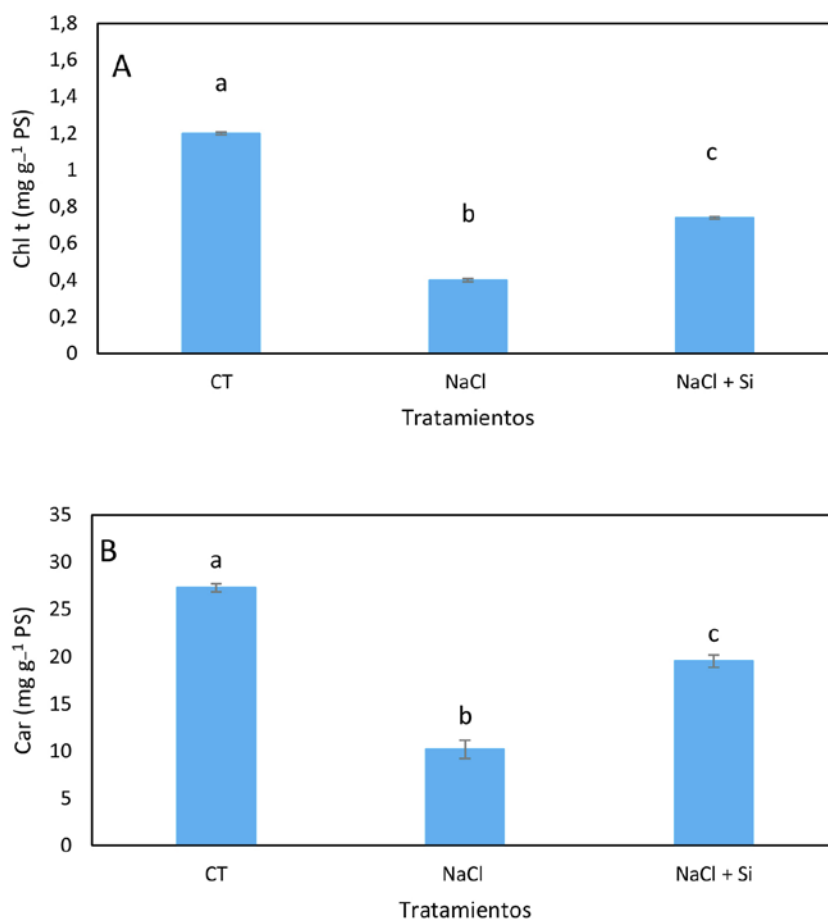


FIGURA 2

Concentración foliar de clorofilas totales (Chl t) (A) y carotenoides (car) en plantas control, plantas tratadas con NaCl y plantas tratadas con NaCl + Si. En cada tratamiento los valores (medias $\pm$ error estándar) seguidos de letras distintas representan diferencias significativas ($P < 0,05$).

de salinidad impuestas afectaron negativamente la biomasa foliar y, posteriormente, el crecimiento de la planta; sin embargo, el suministro de Si mejoró este parámetro, mostrando un papel importante en aliviar el impacto negativo del estrés salino en la biomasa foliar. En este contexto, se ha demostrado previamente que los tratamientos de plantas jóvenes de 'Cabernet Sauvignon' con 100 mM de NaCl disminuyen considerablemente la altura de la planta, las tasas de expansión del área foliar y el peso seco; sin embargo, el Si exógeno mejora estos atributos de crecimiento (Qin *et al.*, 2016). Por otro lado, los pigmentos fotosintéticos se evaluaron a través de las clorofilas totales (chl t) (Figura 2A) y carotenoides (car) (Figura 2B). Los resultados revelaron que el estrés salino disminuyó el contenido de estos pigmentos; mientras la adición de Si mejoró los niveles de chl t y car. Del mismo modo, en otro sistema experimental, bajo estrés por NaCl durante un corto plazo periodo, los contenidos de Chl t disminuyen en las hojas de 'Cabernet Sauvignon' en comparación con el control; sin embargo, el Si exógeno alivia esta reducción (Qin *et al.*, 2016). En este sentido, Liang *et al.* (2015) indican que el silicio podría proteger el aparato fotosintético, lo que conduce al aumento de la tolerancia a la sal.

En cuanto a la acumulación de fitohormonas, el estrés por NaCl aumentó los niveles foliares de ABA; sin embargo, el aporte de Si al riego con agua salada no modificó los contenidos de esta hormona en comparación con el control (Figura 3A). Los datos también sugieren que la aplicación de Si ayuda eficazmente a mantener los niveles de ABA, mejorando así la respuesta de las plantas al estrés salino. Por otro lado, el SA siguió una tendencia similar a la del ABA, con un aumento notable en las plantas sometidas a estrés salino (Figura 3B). La acumulación de SA inducida por el estrés salino parece ser positiva para la tolerancia de 'castellana negra' a la salinidad. En este sentido, se ha descrito que el SA exógeno mejora la

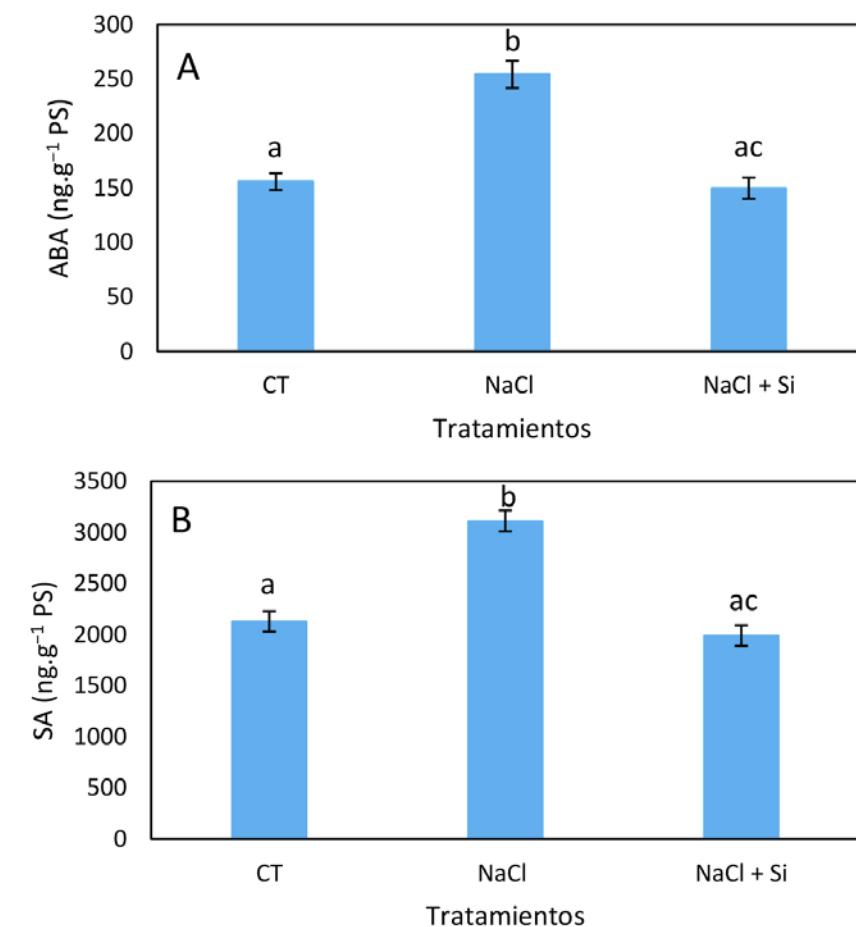


FIGURA 3
Concentración foliar de ABA (A) y SA (B) en plantas control, plantas tratadas con NaCl y plantas tratadas con NaCl + Si. En cada tratamiento los valores (medias ± error estándar) seguidos de letras distintas representan diferencias significativas ($P < 0,05$).

acumulación de glicina betaína, fortalece el sistema antioxidante y reduce la síntesis de etileno, mejorando así el crecimiento y la fotosíntesis frente al estrés salino (Khan *et al.*, 2014). Adicionalmente, el SA exógeno mejora la tolerancia de las plantas al potenciar la fotosíntesis y los sistemas antioxidantes, aumentar los niveles de prolina y azúcares solubles y promover la transcripción génica (Li *et al.*, 2023). Nuestros datos también mostraron que la adición de Si al agua de riego salinizada mantuvo un contenido de SA similar al del control.

Por otro lado, los datos muestran que el estrés salino aplicado, independientemente del tratamiento exógeno, indujo un aumento del contenido de

K⁺ (Figura 4A) y una disminución de Ca²⁺ (Figura 4B) en las hojas en comparación con el control. Por lo tanto, la adición de Si no alteró significativamente la acumulación de estos macronutrientes en comparación con el estrés con NaCl solo. Nuestros resultados coinciden parcialmente con hallazgos previos, que indican que la salinidad reduce la absorción de K⁺ y Ca²⁺ debido al aumento de la acumulación de Na⁺ (Assaha *et al.*, 2017); no obstante, se ha revelado que el Si mejora los niveles de K⁺ y Ca²⁺ en estas condiciones (Ahmad *et al.*, 2019). El K⁺ se ha identificado como el principal soluto inorgánico responsable de los cambios en la turgencia de las células, que a su vez

controla la apertura estomática. En nuestro estudio, el estrés salino, ya sea aplicado solo o con Si, resultó en un aumento significativo en la razón K^+/Ca^{2+} en comparación con el control, sugiriendo una absorción preferencial del K^+ en comparación con el Ca^{2+} en este cultivar bajo estrés salino.

Además, como se esperaba el estrés por NaCl aumentó notablemente la acumulación de Na^+ en comparación con el control (**Figura 4C**); sin embargo, la aplicación de Si redujo significativamente la concentración de este elemento. De acuerdo con nuestros resultados, Qin *et al.* (2016) reportaron un aumento significativo de Na^+ foliar en plantas jóvenes de 'Cabernet Sauvignon' expuestas a estrés salino, y el aporte de Si disminuye dicha acumulación. En este sentido, la aplicación de Si mejora el secuestro de Na^+ dentro de las vacuolas, lo que regula su aumento excesivo en los cloroplastos. Además, el aporte de Si induce una relación K^+/Na^+ óptima, concentración iónica y balance de nutrientes (Almeida *et al.*, 2017). De igual manera, Hurtado *et al.* (2021) indican que el Si mejora la acumulación de K^+ y Ca^{2+} en comparación con el Na^+ , lo que conduce a una mejora del crecimiento y el rendimiento.

En conclusión, los datos destacan la participación de varios factores clave, como las fitohormonas, los pigmentos fotosintéticos, y los nutrientes minerales esenciales, en la mejora del ajuste osmótico, lo que ayuda a modular la respuesta de la vid 'castellana negra' al estrés salino. Asimismo, se sugiere que el Si desempeña un papel importante en la mejora de la resiliencia de la vid a la salinidad mediante la regulación de estas respuestas fisiológicas al estrés.

Bibliografía

Urbano-Gálvez, A., López-Climent, M. F., Gómez-Cadenas, A., & Mahouachi, J*. (2025). Effectiveness of exogenous silicon and proline on mediating grapevine 'castellana negra' responses to salt stress. *Scientific Reports*, 15(1), 32751. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17312-7>

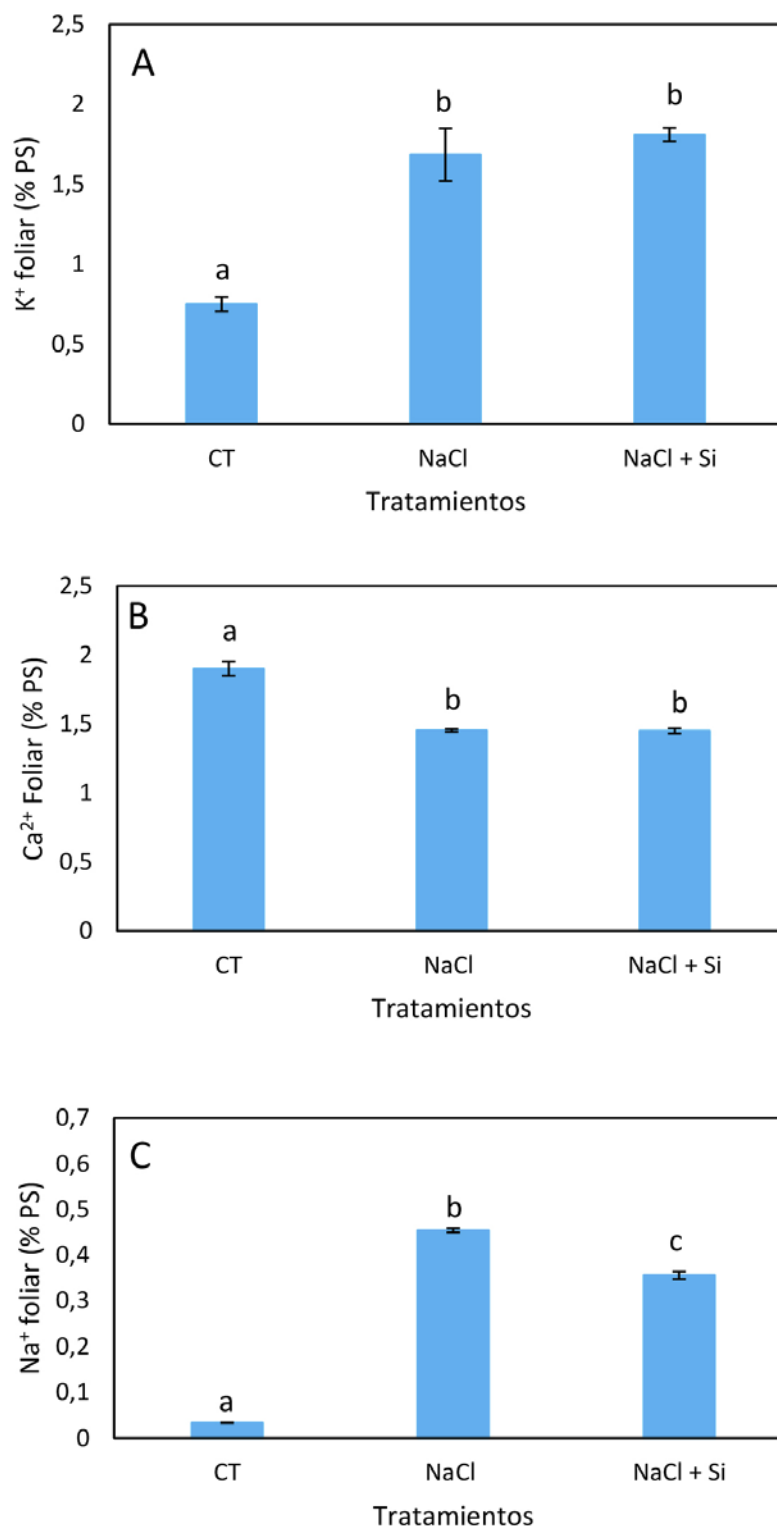


FIGURA 4 Concentración foliar de K^+ (A) y Ca^{2+} (B) y Na^+ (C) en plantas control, plantas tratadas con NaCl y plantas tratadas con NaCl + Si. En cada tratamiento los valores (medias $\pm$ error estándar) seguidos de letras distintas representan diferencias significativas ($P < 0,05$).