UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Efecto de la aplicación foliar y edáfica de silicio sobre el estatus nutricional del tallo floral y la poscosecha en rosa (*Rosa x hybrida* L.) cv. 'Brighton'

Eduard Machado López

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá D.C, Colombia

2024

Efecto de la aplicación foliar y edáfica de silicio sobre el estatus nutricional del tallo floral y la poscosecha en rosa (*Rosa x hybrida* L.) cv. ‘Brighton’

Eduard Machado López

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ciencias Agrarias

Director:

Doctor Víctor Julio Flórez Roncancio

Codirector:

Ph.D. Stanislav Magnitskiy

Línea de Investigación: Fisiología de Cultivos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá D.C., Colombia

2024

Esta tesis está dedicada a mi esposa Sofia y a mis hijos Juliana y Santiago. Gracias por la paciencia y el amor entregado aun cuando es mucho el tiempo que no estuve presente.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

_____

Eduard Machado López

Fecha 15/09/2024

Agradecimientos

Después de varios semestres de trabajo arduo, deseo brindar mis agradecimientos a todas aquellas personas que dieron su grano de arena para la realización de esta tesis de maestría.

A mi director profesor Víctor Flórez por tantas horas de paciencia y enseñanza, a mi codirector profesor Stanislav Magnitskiy por su aporte y observaciones claves en la elaboración de este escrito.

A Sandra Mendoza por el apoyo en toma de datos en el laboratorio poscosecha.
Al ingeniero David Augusto Hernández por el apoyo en el establecimiento del experimento en los invernaderos bajo su direccionamiento y su valioso aporte en el desarrollo experimental en campo.

Muchas Gracias.

Resumen

La rosa se considera el principal cultivo exportable en las flores de corte a nivel mundial, en donde Colombia se ubica como el segundo país productor y comercializador de esta flor. El silicio (Si) se considera un elemento para las plantas gracias a la tolerancia en condiciones de estrés, y por aumentar el rendimiento de algunos cultivos. Recientemente se ha reportado un posible efecto del Si en la nutrición mineral, sin embargo, se ha desarrollado poca investigación que expliquen estos eventos. Por lo tanto, se tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación exógena de tres fertilizantes de Si de manera foliar y edáfica sobre la vida poscosecha y el estado nutricional de rosa. Se emplearon plantas de la variedad 'Brighton' de siete años de edad, las cuales se sometieron a aplicaciones de K_2O_3Si de forma foliar (SF) y al suelo (SS) para cada uno de los tres fertilizantes que contenían concentración de Si diferentes (SF1-3, SS1-3), dejando un testigo sin aplicaciones de Si. Se encontró que el tratamiento SS, especialmente SS1, fue el que más disminuyó la concentración de etileno, pérdida de masa y severidad de botritis. Asimismo, la aplicación de SF y SS redujo la concentración de Fe y S, sin embargo, este efecto fue más marcado cuando se aplicó SS2. Por el contrario, tanto SF como SS incrementó la concentración de Mn, pero se vio más pronunciado cuando se aplicó SS1 y SS2. El Zn aumentó únicamente con la aplicación de SS1. Los macronutrientes no se vieron afectados por la aplicación de Si. Con estos resultados, se logró evidenciar el efecto de la aplicación de Si en la vida y calidad poscosecha, y sobre la concentración de microelementos en el tallo floral de rosa var. 'Brighton'.

Palabras clave: tallo floral, etileno, longevidad floral, absorción de nutrientes, micronutrientes

Abstract

Effect of foliar and soil silicon application on the nutritional status of the floral stem and postharvest in rose (Rosa x hybrida L.) cv. 'Brighton'

The rose is considered the main exportable crop in cut flowers worldwide, where Colombia is the second largest producer and marketer of this flower. Silicon (Si) is considered an element for plants due to its tolerance to stress conditions, and for increasing the yield of some crops. Recently, a possible effect of Si on plant mineral nutrition has been reported, however, little research has been developed to explain these events. Therefore, the objective was to evaluate the effect of the exogenous application of three Si fertilizers in foliar and soil applications on the postharvest life and nutritional status of roses. Seven-year-old plants of the variety 'Brighton' were subjected to foliar (SF) and soil (SS) applications of K_2O_3Si for each of the three fertilizers containing different Si concentrations (SF1-3, SS1-3), leaving a control without Si applications. It was found that the SS treatment, especially SS1, was the one that most decreased ethylene concentration, mass loss and botrytis severity. Likewise, the application of SF and SS reduced Fe and S concentration, however, this effect was more marked when SS2 was applied. In contrast, both SF and SS increased Mn concentration, but this was more pronounced when SS1 and SS2 were applied. Zn increased only with the application of SS1. Macronutrients were not affected by Si application. With these results, the effect of Si application on postharvest life, postharvest quality, and microelement concentration in the flower stem of rose var. 'Brighton' was demonstrated.

Keywords: flower stalk, ethylene, flower longevity, nutrient uptake, micronutrients

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XV**

Introducción **1**
Referencias 3

1. Capítulo 1: Evaluación del efecto de aplicaciones foliares y edáficas de silicio en precosecha sobre la longevidad floral en rosa cv. 'Brighton' **6**
1.1 Resumen 6
1.2 Introducción 7
1.3 Materiales y Métodos 9
1.3.1 Material vegetal y localización 9
1.3.2 Tratamientos 9
1.3.3 Simulación de viaje 10
1.3.4 Determinación de pérdida de masa fresca de los tallos florales 11
1.3.5 Determinación de la evolución de O_2 y CO_2 11
1.3.6 Medición de la evolución de etileno 11
1.3.7 Caída de pétalos 12
1.3.8 Determinación del porcentaje de afectación por botritis 12
1.3.9 Diseño experimental y análisis de datos 13
1.4 Resultados 14
1.4.1 Determinación de la pérdida de masa fresca en los tallos florales 14
1.4.2 Evolución de oxígeno, dióxido de carbono y etileno 15
1.4.3 Caída de pétalos 18
1.4.4 Determinación del porcentaje de afectación por botritis 19
1.5 Discusión 20
1.6 Referencias 23

2. Capítulo 2: Efecto de la aplicación foliar y edáfica de silicio sobre el estado nutricional de rosa (*Rosa* x *hybrida* L.) cv. 'Brighton' **27**
2.1 Resumen 27
2.2 Introducción 28
2.3 Materiales y métodos 28
2.3.1 Material vegetal y localización 29
2.3.2 Diseño Experimental 30
2.3.3 Contenido nutricional 30
2.3.4 Análisis estadístico 31
2.4 Resultados 32
2.4.1 Macronutrientes 32
2.4.2 Micronutrientes 36
2.4.3 Elementos benéficos 40
2.5 Discusión 41
2.5.1 Efecto de la aplicación de Si sobre la concentración de macronutrientes 41

2.5.2 Efecto de la aplicación del Si sobre la concentración de micronutrientes 43
2.5.3 Efecto de la aplicación de Si sobre la concentración de elementos benéficos 45
2.6 Referencias 46

3. Conclusiones y recomendaciones 51
3.1 Conclusiones 51
3.2 Recomendaciones 51

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Perfiles de la pérdida de masa fresca en tallos florales de rosa cv Brighton, en plantas sometidas a aplicaciones de silicio foliar y edáfico 15
Figura 2. (**A**) Tasas de consumo de oxígeno (O_2), (**B**) tasa de producción de dióxido de carbono (CO_2) y (**C**) etileno (C_2H_4) en tallos florales de rosa cv. Brigthon en plantas sometidas a tratamientos con y sin silicio. 18
Figura 3. Cantidad promedio de pétalos caídos en tres tallos florales de rosa cv. Brigthon durante la evaluación poscosecha de plantas sometidas a la aplicación precosecha de silicio..... 19
Figura 4. (A) Probabilidad de incidencia y (B) severidad de botritis en pétalos de rosa cv. Brigthon en plantas sometidas a la aplicación de silicio en precosecha durante el tiempo de evaluación. 20
Figura 5. Concentración de nitrógeno (N) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si) 32
Figura 6. Concentración de fósforo (P) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 33
Figura 7. Concentración de potasio (K+) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 34
Figura 8. Concentración de calcio (Ca^{+2}) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 34
Figura 9. Concentración de magnesio (Mg^{+2}) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). 35
Figura 10. Concentración de azufre (S) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 36
Figura 11. Concentración de hierro (Fe) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 37
Figura 12. Concentración de manganeso (Mn) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si) 38
Figura 13. Concentración de cobre (Cu) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 38
Figura 14. Concentración de zinc (Zn) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 39

Figura 15. Concentración de boro (B) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. ‘Brighton’ sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 40
Figura 16. Concentración de sodio (Na) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. ‘Brighton’ sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si)..... 40
Figura 17. Concentración de silicio (Si) en hoja de rosa cv. ‘Brighton’ sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si).. 41

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Tratamientos utilizados en plantas de rosa cv. Brighton sometidas a aplicaciones de silicio foliar o edáfico..... 10
Tabla 2. Promedios del área bajo la curva en la medición de la pérdida de masa fresca en tallos florales de rosa cv Brighton, de plantas sometidas a aplicaciones de silicio foliar y edáfico..... 14
Tabla 3. Análisis comparativo del área bajo la curva en la medición de las tasas de oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2) y etileno (C_2H_4) en tallos florales de rosa cv Brighton, en plantas sometidas a aplicaciones de silicio foliar y edáfico. 16
Tabla 4. Tratamientos utilizados en plantas de rosa cv. Brighton sometidas a aplicaciones de silicio foliar o edáfico..... 30
Tabla 5. Valores recomendados para concentraciones de nutrientes foliares en *Rosa* spp. cultivados en la Sabana de Bogotá. 30

Introducción

La producción y comercialización en flores de corte representan un importante valor económico en los diferentes mercados globales. Según el International Trade Centre (ITC, 2023), Colombia se ubica en el segundo lugar en la exportación de flores de corte y botones florales al alcanzar valores de US$ 1727 millones para el año 2021, dentro de los cuales la rosa (*Rosa* x *hybrida* L.) es una de las principales flores de exportación con US$ 367 millones, con una participación del 21,13% del total nacional. La rosa se considera el principal cultivo exportable de flores de corte a nivel mundial, lo que resalta el valor económico de esta flor para la horticultura colombiana, en donde la producción está ubicada en los departamentos de Cundinamarca y Antioquia con un porcentaje de participación de 65% y 33%, respectivamente (Faust y Dole, 2021), y contribuye al desarrollo económico de la región al generar anualmente más de 200.000 empleos formales, entre directos e indirectos (MADR, 2022).

La producción de rosa presenta retos limitantes en los mercados de todo el mundo, como mantener la calidad y vida poscosecha de las flores, y garantizar la optimización de la nutrición mineral (Darras, 2020). La longevidad floral en poscosecha es un rasgo de calidad funcional y comercial importante para la rosa; en donde, la senescencia de las flores es uno de los atributos de mayor interés (Wu *et al*., 2022). La senescencia de las rosas se caracteriza por (1) limitar el suministro de agua a las flores, lo que provoca la interrupción de la relación hídrica y disminuye la vida útil del florero (da Costa *et al*., 2021); (2) cambios en su fisiología poscosecha, específicamente en el aumento en la producción de etileno, agotamiento de los carbohidratos almacenados, mayor actividad respiratoria, e incremento de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Rezai *et al*., 2023); y (3) la prevalencia de problemas fitosanitarios, como el moho gris (*Botrytis cinerea*), que se han asociado como una consecuencia de los cambios fisicoquímicos durante la maduración etileno-dependientes de las flores (Ha *et al*., 2022).

Por otra parte, el manejo integrado de la fertilización influye directamente en la producción, rendimiento y calidad de las rosas, sin embargo, la condiciones ambientales afectan la fertilización en rosa, como las características fisicoquímicas del suelo, la humedad relativa y el pH de la solución nutricional (Cabrera *et al*., 2009; Roosta y Rezaei, 2014). Un alto o moderado nivel de humedad relativa del aire conlleva a una disminución en la acumulación de calcio en los pétalos de las rosas (menor relación K/Ca), lo que conlleva a la reducción en la longevidad poscosecha de la flor y en la calidad estética de las rosas (Torre *et al*., 2001). Huché-Thélier *et al*. (2011) reportaron que un nivel de nitrógeno moderado o bajo durante la etapa de crecimiento vegetativo de las rosas, se tradujo en plantas de apariencia asimétrica, menos vigorosas y con un desarrollo irregular de brotes. Igualmente, los micronutrientes representan una parte importante para el óptimo desarrollo de las rosas.

Cambios en el pH de la solución nutritiva en el cultivo de rosas puede llevar a baja absorción de micronutrientes (Roosta y Rezaei, 2014), y se reflejan deficiencias de hierro, zinc, manganeso y cobre, ocasionando menor elongación y engrosamiento de los tallos, mayores síntomas de deficiencia nutricional, y mayor infección de *Sphaerotheca pannosa* (Khoshgoftarmanesh *et al*., 2008). Por lo tanto, se deben implementar estrategias que garanticen la mayor absorción y translocación de nutrientes minerales en plantas de rosa para evitar afectaciones su crecimiento y desarrollo, y que influyen directamente en la calidad poscosecha de esta flor. Algunos estudios han demostrado que implementar el silicio (Si) dentro del plan de fertilización podría mejorar la disponibilidad, absorción y translocación de nutrientes en las raíces (Pavlovic *et al*., 2021), y reducir la incidencia de fitopatógenos en plantas (Pozo *et al*., 2015).

El silicio se reconoce por sus beneficios en el crecimiento y desarrollo de las plantas superiores. Las plantas adquieren silicio de la solución del suelo en forma de ácido monosilícico [H_4SiO_4] de forma pasiva o activa, dependiendo de la especie (Ma *et al*., 2023). A medida que la concentración de silicio en la savia de la planta aumenta, este puede ser polimerizada en gel de sílice [$SiO_2 \cdot H_2O$] y se deposita en los espacios intercelulares de las raíces y hojas (Ma y Yamaji, 2006). Además, la cantidad de silicio que acumulan las plantas varía significativamente entre diferentes especies y variedades, con porcentajes que oscilan entre el 0,1% y el 10% del peso seco (Kaur y Greger, 2019). Sin embargo, algunas especies, como el bambú, logra acumular más del 14% de silicio en hojas y tallos (Collin *et al*., 2012).

La mayoría de las plantas ornamentales cultivadas en invernadero, como la *Petunia hybrida*, acumulan bajos contenidos de Si en las hojas, pero plantas de esta especie pueden acumular altas concentraciones de Si en la flor (Boldt y Altland, 2021), por lo que podría afectar la vida poscosecha de las flores ornamentales. En plantas de rosa, la aplicación de silicato de potasio (K_2SiO_3) al suelo aumentó la longitud, diámetro y peso de los tallos florales, el diámetro del pedúnculo, la longevidad de la flor, el índice de flores abiertas (Geerdink *et al*., 2020) y redujo la severidad de mildeo polvoso (Albornoz *et al*., 2016) durante la poscosecha; y, gracias al efecto del Si sobre el aumento en el sistema antioxidante, se disminuyó el daño causado por los radicales libres del oxígeno (ROS) y por la peroxidación lipídica (El-Serafy, 2019). Por otro lado, el Si puede afectar la absorción, distribución y funcionalidad de varios nutrientes minerales en plantas no estresadas (Pavlovic *et al*., 2021). En rosa var. 'Snowflake', aplicaciones de Si por aspersiones foliares mejoraron la concentración de Ca, Mg, B y Mn en las hojas, en comparación con plantas no tratadas y con suministro de Si al suelo (Guio-Rodríguez *et al*., 2022), así como se ha reportado en otras especies de importancia agronómica (Greger *et al*., 2018). Es evidente la funcionalidad e importancia del Si en el cultivo de rosa a nivel nutricional y calidad poscosecha. Sin embargo, estos efectos pueden afectarse según la variedad, la especie, tipo de suelo, método de aplicación, fuente de Si, y los niveles de Si endógenos (Takashi *et al*., 1990; Wiese *et al*, 2007; Greger *et al*., 2018). Por lo tanto, al establecer un manejo agronómico adecuado con la implementación de Si, se podría obtener el beneficio de variables poscosecha, como aumentar la longevidad del tallo floral,

y variables que mejoren el contenido nutricional de la rosa cv. ‘Brighton’, dependiendo de su método de aplicación.

Teniendo en cuenta la importancia en la producción de rosa a nivel nacional e internacional, la necesidad de mejorar las variables relacionadas con la poscosecha de flores y absorción de nutrientes, y el efecto beneficioso del silicio en plantas, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación exógena de tres fuentes de silicio de manera foliar y edáfica sobre la calidad poscosecha y el contenido nutricional de rosa cv. ‘Brighton’.

REFERENCIAS

Albornoz, C., Silva, A., & Torres, F. (2016). Fertiriego con silicio en variedades de rosa sobre la severidad de mildeo polvoso (*Sphaerotheca pannosa* var. rosae). *Rev. Cienc. Agr*. 33(2): 84 - 94. http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.55

Boldt, J. K., & Altland, J. E. (2021). Petunia (Petunia× hybrida) cultivars vary in silicon accumulation and distribution. *HortScience*, 56(3), 305-312. https://doi.org/10.21273/HORTSCI15486-20

Cabrera, R.I., Solís-Pérez, A.R., & Sloan, J.J. (2009). Greenhouse rose yield and ion accumulation responses to salt stress as modulated by rootstock selection. *HortScience* 44(7), 2000–2008. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.7.2000

Collin, B., Doelsch, E., Keller, C., Panfili, F., & Meunier, J. (2012). Distribution and variability of silicon, copper and zinc in different bamboo species. *Plant Soil,* 351, 377–387. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0974-9

da Costa, L. C., De Araujo, F. F., Ribeiro, W. S., De Sousa Santos, M. N., & Finger, F. L. (2021). Postharvest physiology of cut flowers. *Ornamental Horticulture*, 27(3), 374–385. https://doi.org/10.1590/2447-536x.v27i3.2372

Darras, A. I. (2020). Implementation of Sustainable Practices to Ornamental Plant Cultivation Worldwide: A Critical Review. *Agronomy*, 10(10), 1570. https://doi.org/10.3390/agronomy10101570

El-Serafy, R. S. (2019). Silica nanoparticles enhances physio-biochemical characters and postharvest quality of *Rosa hybrida* L. cut flowers. *Journal of Horticultural Research*, 27(1). http://dx.doi.org/10.2478/johr-2019-0006

Faust, J. E., & Dole, J. M. (2021). The global cut flowers and foliage marketplace. En: Faust, J., & Dole, J. (Eds.), *Cut flowers and foliages* (pp. 1 – 47). CAB International: Londres.

Geerdink, G. M., Orsi, B., Tezotto-Uliana, J. V., Pessoa, C. O., Sasaki, F. F., & Kluge, R. A. (2020). Pre-harvest silicon treatment improves quality of cut rose stems and maintains postharvest vase life. *Journal of plant nutrition*, 43(10), 1418-1426. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1730894

Greger, M., Landberg, T., & Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7(2),41. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0894-8

Guio-Rodríguez, V. A., Álvarez Herrera, J. G. y Gutierrez Villamil, D. A. (2023). Estado nutricional en rosa hidropónica “Snowflake” bajo diferentes tratamientos de silicio. *Acta Agronómica*, 71(3). https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.105681

Ha, S. T. T., Kim, Y.-T., Yeam, I., Choi, H. W., & In, B.-C. (2022). Molecular dissection of rose and *Botrytis cinerea* pathosystems affected by ethylene. *Postharvest Biology and Technology*, 194. https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1016/j.postharvbio.2022.112104

Huché-Thélier, L., Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Canet, A., Symoneaux, R., Douillet, O., & Guérin, V. (2011). Nitrogen deficiency increases basal branching and modifies visual quality of the rose bushes. *Scientia Horticulturae*, 130(1), 325-334. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.007

ITC, International Trade Centre. (consultado el 24 de agosto del 2023). Disponible en: https://www.trademap.org/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c%7c0603%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c2%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1.

Kaur, H., & Greger, M. (2019). A Review on Si Uptake and Transport System. *Plants*, 8(4), 81. https://doi.org/10.3390/plants8040081

Khoshgoftarmanesh, A. H., Khademi, H., Hosseini, F., & Aghajani, R. (2008). Influence of additional micronutrient supply on growth, nutritional status and flower quality of three rose cultivars in a soilless culture. *Journal of Plant Nutrition*, 31(9), 1543-1554. https://doi.org/10.1080/01904160802244662

Ma, J. F., Zhao, F., Rengel, Z., & Cakmak, I. (2023). Beneficial elements. En: Rengel, Z., Cakmak, I., & White, P. (Eds.), *Marschner's Mineral Nutrition of Plants* (pp. 387 – 418). 4ta ed. Academic Press: Londres. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00012-5

Ma, J.F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci.*, 11(8), 392–397. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007

MADR, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Gobierno Nacional celebra con los floricultores las cifras históricas de San Valentín. https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Gobierno-Nacional-celebra-con-los-floricultores-las-cifras-históricas-de-San-Valent%C3%ADn.aspx

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

Pozo, J., Urrestarazu, M., Morales, I., Sánchez, J., Santos, M., Dianez, F., & Álvaro, J. E. (2015). Effects of Silicon in the Nutrient Solution for Three Horticultural Plant Families on the Vegetative Growth, Cuticle, and Protection Against Botrytis cinerea. *HortScience*, 50(10), 1447-1452. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.10.1447

Rezai, S., Nikbakht, A., Zarei, H., & Sabzalian, M. R. (2023). Physiological, biochemical, and postharvest characteristics of two cut rose cultivars are regulated by various supplemental light sources. *Scientia Horticulturae*, 313, 111934. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111934

Roosta, H., & Rezaei, I. (2014). Effect of Nutrient Solution pH on the Vegetative and Reproductive Growth and Physiological Characteristics of Rose Cv. 'Grand Gala' in Hydroponic System. *Journal of Plant Nutrition*, 37:13, 2179-2194. https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920377

Torre, S., Fjeld, T., & Gislerød, H. (2001). Effects of air humidity and K/Ca ratio in the nutrient supply on growth and postharvest characteristics of cut roses. *Scientia Horticulturae*, 90(3-4), 291-304. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00230-8

Wiese, H., Nikolic M., & Römheld, V. (2007). Silicon in plant nutrition. En: Sattelmacher, B. & Horst, W. J. (eds), *The apoplast of higher plants: Compartment of storage, transport and reactions* (pp. 33-47). Springer: Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5843-1_3

Wu, Y., Zuo, L., Ma, Y., Jiang, Y., Gao, J., Tao, J., & Chen, C. (2022). Protein Kinase RhCIPK6 Promotes Petal Senescence in Response to Ethylene in Rose (Rosa Hybrida). *Genes*, 13(11), 1989. https://doi.org/10.3390/genes13111989

1. Capítulo 1: Evaluación del efecto de aplicaciones foliares y edáficas de silicio en precosecha sobre la poscosecha en rosa cv. 'Brighton'

Machado López Eduard[1] - Darghan Contreras Aquiles [2] - Flórez Roncancio Víctor Julio[3]

[1] Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9388-7370

[2] Ph.D Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia aqedarghanco@unal.edu.co

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5790-1684

[3] Profesor Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia vjflorezr@unal.edu.co

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3081-2400

1.1 Resumen

Entre las variables más relacionadas con la longevidad del tallo floral de rosa están la tasa de respiración y la evolución en la producción de etileno, las cuales inciden sobre el desarrollo de botrytis. De los nutrientes, el silicio (Si) está involucrado en mecanismos de defensa de las plantas y su aplicación podría convertirse en una estrategia para mejorar el control de enfermedades. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de aplicaciones foliar y edáfica de silicio en precosecha sobre la vida en florero en rosa cv. Brighton. Para ello, se utilizaron tres fuentes de Si líquidas en forma de silicato de potasio: 1) con 322 g L^{-1} de Si soluble; 2) con de 360 g L^{-1} de Si total; 3) y con 330 g L^{-1} de Si soluble. Cada una de ellas, con frecuencia quincenal, se aplicó cinco veces de forma foliar o edáfica para un total de seis tratamientos y el tratamiento control, con la fórmula de fertirriego estándar de la finca, sin aplicación de Si foliar o edáfico. En poscosecha se determinó la pérdida de masa fresca, el consumo de O_2, la evolución de CO_2 y la concentración de etileno; así mismo, se contó el número de pétalos caídos y se evaluó la severidad de botritis. Se observó que el tratamiento al suelo con la fuente 1 disminuyó de manera

significativa la concentración de etileno, en comparación con los demás tratamientos. También se constató que, con excepción del tratamiento foliar de la fuente 3, los demás tratamientos, tanto foliares como edáficos, presentaron una probabilidad en el control de botritis superior al testigo, con el tratamiento al suelo de la fuente 1, como el de mejor desempeño en el control de la enfermedad en la poscosecha de rosa cv. Brigthon.

Palabras claves: flor de corte, tallo floral, etileno, longevidad floral

1.2 Introducción

El sistema productivo de rosa (*Rosa x hybrida* L.) es el principal cultivo exportable de flores de corte a nivel mundial (Mazrou *et al.*, 2022). En el país, genera anualmente cerca de 200.000 empleos formales, con 65% de mujeres rurales, especialmente en las zonas de la sabana de Bogotá y el oriente antioqueño. Con un valor para las exportaciones colombianas de flores frescas en 2021 próximo a los US$ 1.800 millones (Minagricultura, 2022).

Sin embargo, para que exista una comercialización efectiva de las flores frescas se debe tener en cuenta que la longevidad floral en poscosecha es un rasgo de calidad funcional y comercial importante para las plantas ornamentales; en donde, la senescencia de las flores usualmente relacionada con el envejecimiento de los pétalos es uno de los atributos de mayor interés (Wu *et al*., 2022). Otros factores que determinan la longevidad de la rosa de corte son la caída y el cambio de color de los pétalos, así como, la deshidratación de las flores y hojas, los cuales son dependientes de la sensibilidad del cultivar al etileno (Ha *et al*., 2020).

La vida en florero de la rosa es relativamente corta, que dependiendo de la variedad puede ser de ocho a quince días, lo que se atribuye principalmente a un desbalance hídrico temprano y al efecto ocasionado por etileno (Ha *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2001). El marchitamiento del tallo floral también se atribuye al bloqueo vascular por embolia o microorganismos (Hashemabadi *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2001). En la poscosecha, también se consideran otros cambios en la fisiología de los tallos florales, como el aumento en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la liberación de etileno, lo que incide en la senescencia floral (Hashemabadi *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2017). El aminoethoxy-vinil-glycina (AVG) inhibe la síntesis y el 1-metilciclopropeno (1-MCP) la acción del etileno; por lo que, con la aplicación de estos compuestos se obtendría una mayor vida en florero de la rosa de corte (Taiz *et al*., 2015; Ha *et al*., 2020).

Por otra parte, la disminución en la absorción de agua, el consumo de carbohidratos, el aumento de la actividad respiratoria y la producción de etileno son signos de senescencia del tallo floral; y, como este mantiene una actividad respiratoria intensa, agotan las reservas ya limitadas de carbohidratos en los tejidos (Da Costa *et al.*, 2021).

En los productos perecederos, como las flores de corte, botritis es un patógeno de relevancia que, al producir lesiones en los pétalos, reduce su vida en florero y en consecuencia el valor de mercado de las flores. La infección con este patógeno de tipo necrotrófico es una de las razones más importantes por las que el consumidor rechaza los

tallos florales de rosa, lo que genera pérdidas financieras a los productores (Ha *et al.*, 2021).

La expresión génica de la biosíntesis del etileno mantiene una relación lineal con la incidencia y severidad de *Botrytis cinerea*, al afectar positivamente su desarrollo y diseminación. Asimismo, durante el almacenamiento y el transporte de la flor la hormona n mención también puede aumentar la severidad de la enfermedad y, por tanto, el marchitamiento de los pétalos (Ha *et al.*, 2021b; Ha *et al*., 2022).

En términos de nutrición mineral de plantas, entre los elementos esenciales, recientemente ha cobrado relevancia el microelemento silicio (Si) (Taiz *et al*., 2015). La planta absorbe el Si en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4), el cual puede polimerizarse en gel de sílice amorfo en los espacios intercelulares de las raíces, y en las paredes celulares de las células de las hojas y de las brácteas (Mitani *et al.*, 2005).

El H_4SiO_4 entra a las células de raices a través del transportador Lsi1, que pertenece a la familia de proteínas intrínsecas mayores (NIP); y, es exportado, mediante eflujo, hacia la parte aérea de la planta por los transportadores de silicio Lsi2. Algunas especies disponen del transportador Lsi6 en las células parenquimáticas de las hojas, el cual ayuda a mover el Si a través del haz vascular (Kaur y Greger, 2019). El Si es considerado un elemento benéfico por estimular la tolerancia contra estreses biótico y abiótico mediante la neutralización de especies reactivas del oxígeno (ROS) y la regulación de diferentes vías metabólicas, como la síntesis del ácido jasmónico, antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos, y osmoprotectantes (Ranjan *et al*., 2021).

La mayoría de las plantas ornamentales cultivadas en invernadero, como *Petunia hybrida*, acumulan bajos contenidos del Si en las hojas; sin embargo, plantas de esta especie pueden acumular altas concentraciones de Si en la flor pasando de 253 a 1.383 mg Kg^{-1} (Boldt & Altland, 2021). Por otro lado, la aplicación de Si mejora el mecanismo de defensa de las plantas en cultivos agrícolas, lo que puede convertirse en una estrategia para mejorar el control de enfermedades (Faziha *et al.*, 2019). También, Wang *et al. (*2020) encontraron evidencia genética en la inducción del ácido salicílico y, por ende, el mecanismo de defensa que esta hormona activa con alto contenido de silicio. Entre tanto, para El-Serafy (2019) los tratamientos con nanopartículas de sílice pueden mejorar la longevidad y la calidad poscosecha de la rosa de corte, al reducir la peroxidación lipídica y estimular el metabolismo antioxidante, por lo que, se conservaría la integridad de la membrana.

Al reconocer que la vida en florero de la rosa de corte es relativamente corta, normalmente de cinco a ocho días, se hace evidente que las pérdidas poscosecha son una amenaza para la rentabilidad de la industria floricultora (Aziz *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021). Es por esto, que preservar su calidad poscosecha a través de un enfoque nutricional es de importancia económica y ambiental. Con un manejo nutricional que fortalezca la defensa de las plantas en contra de enfermedades fungosas, se podría implementar un manejo agronómico más amigable con el ambiente, al disminuir el número de aplicaciones de fungicidas u otros pesticidas.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de aplicaciones foliares y edáficas de silicio en precosecha sobre la longevidad floral en rosa cv. Brighton.

1.3 Materiales y Métodos

1.3.1 Material vegetal y localización

El estudio fue realizado en una finca dedicada a la producción de flores de corte de exportación, ubicada al noroccidente de la sabana de Bogotá, en el municipio de El Rosal, Cundinamarca, ubicada a 4° 50’ 45,402" latitud norte; 74° 14’ 33,807" latitud Oeste entre la vía El Rosal – Subachoque, con temperaturas mínima y máxima de 7°C y 22,5°C, respectivamente, radiación PAR promedio de 280,6 µmol m^{-2} s^{-1}, y humedad relativa promedio mes máxima de 80% y mínima de 68%.

Los ensayos fueron conducidos en un invernadero tipo milenio con estructura metálica y cubierta de plástico convencional y sin aditamentos, con altura máxima de 6,8 m y en los laterales de 4,3 m. Con temperaturas mínima y máxima de 8°C y 23°C, respectivamente. El experimento se estableció en un cultivo comercial de siete años con plantas de la variedad Brighton injertada sobre el patrón Natal Briar, sembradas a una densidad de 7,2 plantas / m^2 en camas de 32 x 0,9 m, considerando 178 camas por hectárea. El cultivo está establecido en un suelo caracterizado por ser franco arenoso y pH 6,6. La razón para la escogencia de esta variedad es debida a su alta susceptibilidad a botritis (Gómez, 2013). En promedio, se aplicó un volumen de riego de 675 L / cama / semana, y el manejo nutricional y fitosanitario se realizó como de rutina en un cultivo de rosas (Flórez, 2006).

1.3.2 Tratamientos

Se establecieron siete tratamientos, y en seis de ellos se aplicó silicio en forma de silicato de potasio (K_2SiO_3) de tres procedencias comerciales distintas, de acuerdo con lo descrito en la Tabla 1. Se aplicaron las dosis recomendadas por las casas comerciales para el cultivo de rosas y no se enuncian los nombres de los productos por efectos académicos. Cada tratamiento se acondicionó en una nave de invernadero constituida por ocho camas, y en cada nave se dispuso de cuatro repeticiones, estando conformada la unidad experimental por diez plantas elegidas al azar en la parte media de las camas, las cuales tenían mínimo dos tallos florales de dos semanas y fueron debidamente rotuladas. A las dos semanas después de la programación para la poda, se iniciaron las aplicaciones con frecuencia quincenal, hasta alcanzar cinco y posteriormente evaluar en poscosecha.

Tabla 1. Tratamientos utilizados en plantas de rosa cv. Brighton sometidas a aplicaciones de silicio foliar o edáfico.

Tratamiento*	Producto e Información	Composición	Método de aplicación	Dosis del producto (mL L^{-1})
CT	Control		manejo convencional[1]	N/A
SF1	Fertilizante 1 https://agraforum-sa.com/cibusil-max/	Potasio soluble en agua 140 g L^{-1} y silicio soluble en agua 322 g L^{-1}	Foliar[2]	1
SS1			Edáfico[3]	0,08
SF2	Fertilizante 2 https://insagrin.com/productos/misil-k/	Potasio soluble en agua 100 g L^{-1} y silicio total 360 g L^{-1}	Foliar	1
SS2			Edáfico	0,08
SF3	Fertilizante 3 https://agromil-corona.com/productos-firmeza#:~:text=Es%20un%20fertilizante%20compuesto%20que,la%20calidad%20de%20los%20cultivos.	Potasio soluble en agua 170 g L^{-1}y silicio soluble en agua 330 g L^{-1}	Foliar	1
SS3			Edáfico	0,08

[1] fórmula de fertirriego estándar de la finca, sin aplicación de Si foliar o edáfico.
[2] aspersión a follaje (7 L por cama equivalente a 1.246 L ha^{-1}).
[3] aplicación al suelo (135 L por cama equivalente a 24.030 L ha^{-1}).
* Los tratamientos SF1 a SS3 recibieron el manejo tradicional de la finca más las aplicaciones foliar o edáfica de Si indicadas.

1.3.3 Simulación de viaje

Por tratarse de un producto perecedero de exportación, antes de determinar las variables propuestas para el presente ensayo, fue necesario someter el material vegetal a una simulación de viaje, la cual consiste en periodos de almacenamiento y transporte que simulan las condiciones a que son sometidas los tallos florales durante su itinerario a

destinos en el exterior. Para esta actividad, entre las 09:00 y las 11:00h se cosecharon seis tallos florales por tratamiento en cada una de las cuatro repeticiones, para un total de 168 tallos florales, los cuales fueron hidratados en campo con una solución acuosa (pH = 7,0) a base de hipoclorito de sodio (3 mL L^{-1}) durante 20 min. Enseguida, este material vegetal fue transportado en cajas de cartón al laboratorio de poscosecha de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, donde, en ambiente controlado se realizó la simulación de almacenamiento y transporte de tres días a 3°C.

1.3.4 Determinación de pérdida de masa fresca de los tallos florales

Dispuestos los tallos florales en el laboratorio y después de la simulación de viaje, por repetición se seleccionaron tres de los seis tallos, los cuales se cortaron a una misma longitud de 10 cm según la metodología usada por Barón *et al*. (2021) y se acondicionaron en floreros tipo pebetero sobre mesones de laboratorio, con una solución a base de sacarosa e hipoclorito de sodio, en concentración de 45 mM y 200 mg L^{-1}, respectivamente. Las condiciones en el laboratorio fueron humedad relativa entre 60 y 70%, luz constante entre 4 y 50 µmol m^{-2} s^{-1}, (11h luz natural y 13h luz artificial) y temperatura ambiente entre 14 a 16°C durante el día y 8 a 10°C en la noche, con ventilación a través de apertura de puertas y ventanas, y un ventilador para recirculación de aire. Mediante el uso de una balanza digital se determinó la pérdida de masa fresca en gramos de cada conjunto de tres tallos florales y, en consecuencia, el consumo aproximado de agua tomando la diferencia entre la masa inicial y la masa final de cada tratamiento.

1.3.5 Medición de la evolución de etileno

Se utilizaron los mismos tallos florales dispuestos en el sistema de cámaras herméticas, de donde, con una jeringa se extrajo una muestra de gas de 5 cm^3 con el fin de determinar la concentración de etileno (C_2H_4). Para lo que, se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent 7890 (Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, EE. UU.) equipado con un detector de ionización de llama, con el uso de helio como gas de arrastre a razón de 7 mL min^{-1} y aire seco e hidrógeno como gases de combustión a razón de 300 y 40 mL min^{-1}, respectivamente. Se usó una base nitrogenada patrón de etileno de 101 µL L^{-1} (Linde Colombia S.A., Bogotá, Colombia). Este gas se mezcló con nitrógeno (Linde Colombia S.A., Bogotá, Colombia) para obtener diferentes concentraciones en el rango de 0 -10 µL L^{-1} y la tasa de generación de etileno se calculó utilizando la ecuación 3, descrita por Castellanos *et al*. (2017).

$$r_{C_2H_4} = (\frac{V}{W})(y_{C_2H_4t-1} - y_{C_2H_4t+1})/\Delta t \quad (3)$$

donde $r_{C_2H_4}$ es la tasa de producción de etileno en el tiempo t, Δt es el intervalo de tiempo entre dos mediciones sucesivas, y $y_{C_2H_4t-1}$ es la fracción molar de etileno determinada en la medición anterior que la obtenida en el tiempo t y $y_{C_2H_4t+1}$ es la fracción molar de etileno determinada en la medición posterior que la obtenida en tiempo t.

1.3.6 Determinación de la evolución de O_2 y CO_2

Para determinar el consumo de O_2 y la evolución de CO_2 en un sistema hermético, se utilizó el dispositivo MOCON Checkpoint 3EC y los porcentajes de ambos gases se midieron mediante sensores infrarrojo. Previamente, los tallos florales se confinaron durante 2 h en cámaras herméticas transparentes (Felli®, Taipei, Taiwan), con sistema de cierre hermético y tapa modificada para toma de muestras de gases internos mediante un espacio de cabeza de volumen de 2.210 cm^3. A través de un sello de goma en la parte superior de la cámara hermética se introduce la aguja del dispositivo MOCON y se realiza el muestreo. Durante la evaluación se realizaron seis tomas de datos, día de por medio en cada una de las repeticiones de los tratamientos. La tasa de respiración se calculó utilizando las ecuaciones 1 y 2, descritas por Castellanos *et al*. (2017).

$$rO_2 = (\frac{V}{W})(yo_{2\ t-1} - yo_{2\ t+1})/\Delta t. \quad (1)$$

$$rCO_2 = (\frac{V}{W})(yco_{2\ t-1} - yco_{2\ t+1})/\Delta t \quad (2)$$

donde rO_2 y rCO_2 son las tasas de respiración en el tiempo t, Δt es el tiempo que transcurre entre dos mediciones sucesivas. Mientras que $yo_{2\ t-1}$ y $yco_{2\ t-1}$ son las fracciones molares de O_2 y CO_2 determinadas en la medición anterior que se obtuvieron en el tiempo t y $yo_{2\ t+1}$ y $yco_{2\ t+1}$ son las fracciones molares de O_2 y CO_2 determinadas en la medición posterior que se obtuvieron en el tiempo t, respectivamente.

1.3.7 Caída de pétalos

Para la determinación de la vida en florero también se evaluó la variable caída de los pétalos. Para lo que, cada dos días y durante 14 días se contó el número de pétalos caídos de la cabeza floral. La mediana de esta variable se obtuvo acumulando la información de tres tallos florales en cada una de las repeticiones de los tratamientos.

1.3.8 Determinación del porcentaje de afectación por botritis

Para la determinación del grado de severidad de botritis en la poscosecha se tuvo en cuenta la escala de severidad propuesta por Medina *et al.* (2009); quienes, para los grados de severidad 0, 1, 2, 3 y 4 asignaron los porcentajes de área del pétalo afectado de 0, 1 a 25, 26 a 50, 51 a 75, y 76 a 100, respectivamente. Las mediciones se realizaron cada dos días durante la evaluación de la longevidad floral y en donde la contaminación con el patógeno es propia del ambiente en poscosecha (no inoculada).

1.3.9 Diseño experimental y análisis de datos

El experimento estuvo conformado por siete tratamientos, cuatro repeticiones y tres unidades de observación por unidad experimental. El diseño fue en medidas repetidas con factor entre-sujetos conformado por los siete tratamientos antes descritos en todas las fases (tiempos de evaluación). El factor intrasujetos fue el tiempo con niveles diferentes en las fases.

En la variable pérdida absoluta de masa fresca se utilizó un enfoque univariante y con solo dos niveles de tiempo (inicial y final para generar la diferencia) para el análisis estadístico, específicamente el análisis de varianza para medidas repetidas con enfoque semiparamétrico. El cual, no requiere de supuestos ni de normalidad multivariante ni homogeneidad en las matrices de varianzas y covarianzas, que ha mostrado excelentes resultados en muestras pequeñas (Friedrich *et al*., 2019).

En lo que respecta a la fase asociada con la medición de etileno, O_2 y CO_2 se utilizó el enfoque multivariado. Los resultados generan una tabla de análisis de varianza, que involucra el análisis simultáneo de las tres respuestas en seis niveles del tiempo. Ambos análisis están implementados en la librería MANOVA.RM de Rstudio versión 4.2.2. Como el método en medidas repetidas univariante o multivariante genera los perfiles del comportamiento de la respuesta en los diferentes tiempos de medición, se utilizó el resultado de paralelismo de perfiles para usar el área bajo la curva del progreso de la respuesta de modo escalonado. Con lo que se genera una comparación a posteriori de los perfiles por este atributo usando el análisis de varianza por perfil de repetición solo como paso previo a la comparación post hoc. La cual requirió de dos métodos, a saber, Tukey HSD y Duncan para contrastar los perfiles por respuesta según el área (los análisis de varianza son omitidos pues solo es de interés la comparación a posteriori como una guía al lector) (Simko y Piepho, 2012). Esta metodología de cálculo de área está implementada en la librería agricolae (De Mendiburu, 2009) de Rstudio.

La fase del conteo de pétalos totalmente desprendidos se hizo desde un punto de vista descriptivo mediante un diagrama de líneas discriminado por tratamiento y tiempo de evaluación.

En la fase asociada a la medición de la afectación por botritis se usó el método de estimaciones de ecuaciones generalizadas (GEE) bajo el modelo de ausencia de interacción entre tratamientos y tiempo (por eliminación por efecto nulo), con tabla de probabilidades estimadas por tratamiento y tiempo. La metodología permite evaluar medidas repetidas en respuesta binaria. La metodología permitió estimar la probabilidad de ocurrencia de la afectación por tratamiento en el transcurrir del tiempo. Esta metodología está implementada en la librería geepack versión 1.3.9 (Højsgaard *et al*., 2005) de Rstudio.

1.4 Resultados

1.4.1 Determinación de la pérdida de masa fresca en los tallos florales

Se midió la masa fresca al inicio y al final de la evaluación que duró 11 días, para determinar la diferencia aproximada de deshidratación en los tratamientos. Para el tratamiento control se obtuvo una diferencia de 19,5%, mientras que en los tratamientos SF1, SS1, SS2 y SS3 se obtuvieron diferencias de 14, 14,2, 13,7 y 13,4%, respectivamente.

El modelo estadístico de medidas repetidas con enfoque univariante permitió observar que no hay interacción entre los tratamientos, en razón a que los perfiles de pérdida de masa fresca se muestran paralelos (Figura 1), por tanto, se rechaza la hipótesis de coincidencia asociada a los tratamientos y con efecto del tiempo. En la figura 1 se observa el cambio de la variable en el tiempo y el paralelismo en tales perfiles, con algunas variaciones sin relevancia en los tratamientos SF3 y SS2, sobre todo en la última medición. Por lo que, se puede inferir una diferencia estadística entre algunos de los tratamientos, en donde especialmente los tratamientos SS2, SS3 y SS1 obtuvieron el menor porcentaje de pérdida de masa. Sin embargo, en la determinación del área bajo la curva de cada tratamiento con el análisis de Duncan (95% de confianza) se obtuvieron diferencias estadísticas entre los tratamientos SS2 y SF1, pero no sobre el control CT (Tabla 2).

Tabla 2. Promedios del área bajo la curva en la medición de la pérdida de masa fresca en tallos florales de rosa cv Brighton, de plantas sometidas a aplicaciones de silicio foliar y edáfico.

Tratamiento	Promedio	
SS2	160,83	a
SS3	169,91	ab
SS1	173,28	ab
CT	175,42	ab
SF3	185,79	ab
SF2	188,82	ab
SF1	193,12	b

CT: Control, SF1: Silicio 1 foliar, SF2: Silicio 2 foliar, SF3: Silicio 3 foliar, SS1: Silicio 1 edáfico, SS2: Silicio 2 edáfico, SS3: Silicio 3 edáfico. Promedios seguidos por la misma letra no presenta diferencia significativa por la prueba de Duncan al 95%.

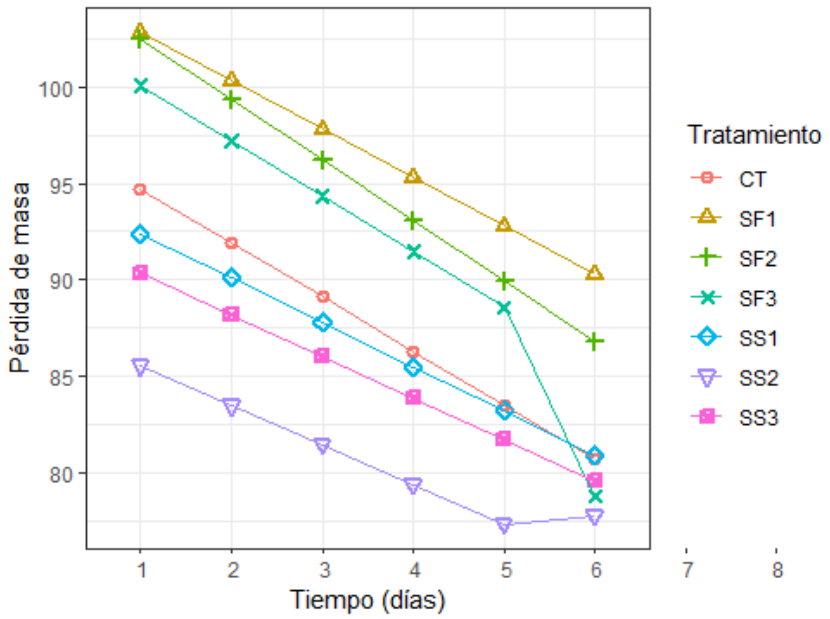

Figura 1. Perfiles de la pérdida de masa fresca en tallos florales de rosa cv Brighton, en plantas sometidas a aplicaciones de silicio foliar y edáfico.

CT: Control, SF1: Silicio 1 foliar, SF2: Silicio 2 foliar, SF3: Silicio 3 foliar, SS1: Silicio 1 edáfico, SS2: Silicio 2 edáfico, SS3: Silicio 3 edáfico.

1.4.2 Evolución de etileno, oxígeno y dióxido de carbono

En la tabla 3 se muestran el análisis estadístico para las variables C_2H_4, O_2 y CO_2, y a partir de la metodología del área bajo la curva, con el diseño de medidas repetidas utilizada mediante la determinación de la hipótesis de paralelismo (Friedrich *et al*., 2019). Para estas variables no se observó interacción de los tratamientos en función del tiempo, mostrando que no hay evidencia en contra de la hipótesis nula del efecto del tiempo sobre los tratamientos. Por tanto, los efectos principales se pueden interpretar directamente.

Por lo tanto, en la tabla 3 se observa que en la variable etileno se destaca que los tratamientos con silicio vía foliar (SF1, SF2 y SF3) y el tratamiento al suelo (SS1) presentan valores significativamente menores que el tratamiento control; mientras que, para los demás tratamientos al suelo (SS2 y SS3) se observa un comportamiento intermedio. También, de forma coherente, el tratamiento con menor tasa de respiración (SF3) presenta una de las menores tasas de producción de etileno.

Para los valores para las variables consumo de O_2 y producción de CO_2 en los tratamientos SF2, SS2 y SS3 son significativamente mayores en comparación con el tratamiento SF3; mientras que, el tratamiento control, junto a los tratamientos SS1 y SF1, muestran un comportamiento intermedio.

Tabla 3. Análisis comparativo del área bajo la curva en la medición de las tasas de etileno (C2H4), oxígeno (O2) y dióxido de carbono (CO2) en tallos florales de rosa cv Brighton, en plantas sometidas a aplicaciones de silicio foliar y edáfico.

C_2H_4			O_2			CO_2		
Tratamiento	**Promedio**		**Tratamiento**	**Promedio**		**Tratamiento**	**Promedio**	
SF2	11,36	a	SF3	29245,6	a	SF3	28046,1	a
SF1	11,61	a	SS1	38614,6	ab	SS1	37131,9	ab
SS1	11,69	a	SF1	43236,4	ab	CT	41418,1	ab
SF3	12,32	a	CT	43422,0	ab	SF1	41947,5	ab
SS3	12,83	ab	SS3	47797,6	b	SS3	45981,5	b
SS2	13,22	ab	SF2	48272,1	b	SS2	46246,7	b
CT	17,06	b	SS2	50079,5	b	SF2	46434,4	b

CT: Control, SF1: Silicio 1 foliar, SF2: Silicio 2 foliar, SF3: Silicio 3 foliar, SS1: Silicio 1 edáfico, SS2: Silicio 2 edáfico, SS3: Silicio 3 edáfico. Promedios seguidos por la misma letra no presenta diferencia significativa por la prueba de Duncan al 95%.

Entre tanto, en las Figuras 2A, 2B y 2C se observa la evolución de las tasas de C_2H_4, O_2 y CO_2 y en función de los tratamientos confinados en los recipientes herméticos, a lo largo del tiempo.

La figura 2 muestra que los perfiles de las curvas de comportamiento de las tres variables en observación no son horizontales en el tiempo, con respuestas no-monótonas; lo que permite inferir diferencia entre tratamientos, ya que no mantienen el mismo patrón de crecimiento.

La tasa de producción de etileno tiene una tendencia creciente en todos los tratamientos hasta el día 7 y luego tiene una caída con tasa variable hasta la última fecha de evaluación. Como se explicó anteriormente, los tratamientos mostraron diferencias estadísticas frente al control. Además, en la figura 2 A, se obtuvo para la primera medición (día 1) un aumento respecto al control de 12 y 7% en los tratamientos SS1 y SS2, respectivamente. Mientras que los tratamientos SF1 y SF2 tuvieron disminución de 39 y 27%, respectivamente, comparados con el control.

En el día 7 se obtuvo el punto más alto en la generación de etileno, con todos los tratamientos por debajo del control, entre los que se destacan SF2 con 104% y SS1 con 101%. En el último día de evaluación (día 11), se pudo observar que solamente el tratamiento SS2 estuvo por encima de la generación de etileno del control, con un 20%

más; mientras que, SF3 y SS1 estuvieron por debajo del control con un 36 y 22%, respectivamente.

Con las diferencias estadísticas de los tratamientos frente al control, también se puede observar en la figura 2 B que en la primera evaluación para el día 1, el tratamiento SF2 y SS2 tuvieron más consumo O_2 que el control en un 35 y 32%, respectivamente, mientras que los tratamientos SF3 y SS1 estuvieron por debajo del consumo de O_2 que tuvo el control en un 69 y 9%, respectivamente. A partir del día 1 los consumos de oxígeno aumentaron hasta el día 7, cuando llega a su máximo pico; en este día 7 los tratamientos SS2 y SS3 obtiene el mayor consumo con un 10 y 8%, respectivamente, en comparación con el control; mientras que, los menores consumos se obtuvieron en los tratamientos SF3 con 50%, SS1 con 17% y SF1 con 12% con respecto al control. En la última evaluación, en el día 11, los consumos de oxígeno más altos fueron en los tratamientos SS3 y SS2 con un 23% cada uno por encima del control, mientras que los SF3 y SS1 estuvieron por debajo del control con un 17 y 10%, respectivamente.

De otra parte, la generación de CO_2 se puede apreciar en la figura 2 C en donde se obtuvo en la primera medición (día 1) un aumento respecto al control de 24 y 21% en los tratamientos SS2 y SF2, respectivamente. Mientras que los tratamientos SF3 y SS1 tuvieron un aumento de 60 y 13%, respectivamente, comparados con el control.

En el punto más alto (día 7) los tratamientos SS3 con 13% y SS2 con 8% estuvieron por encima del control, mientras que los tratamientos SF3 y SS1 estuvieron por debajo en la generación de CO_2 con respecto al control en 55 y 18% respectivamente. En el último día de evaluación, en el día 11, la generación de CO_2 de los tratamientos que fueron los más altos son SS2 con 20% y SS3 con 19% por encima del control, mientras que los SF3 y SF1 estuvieron por debajo del control con un 10 y 9% respectivamente.

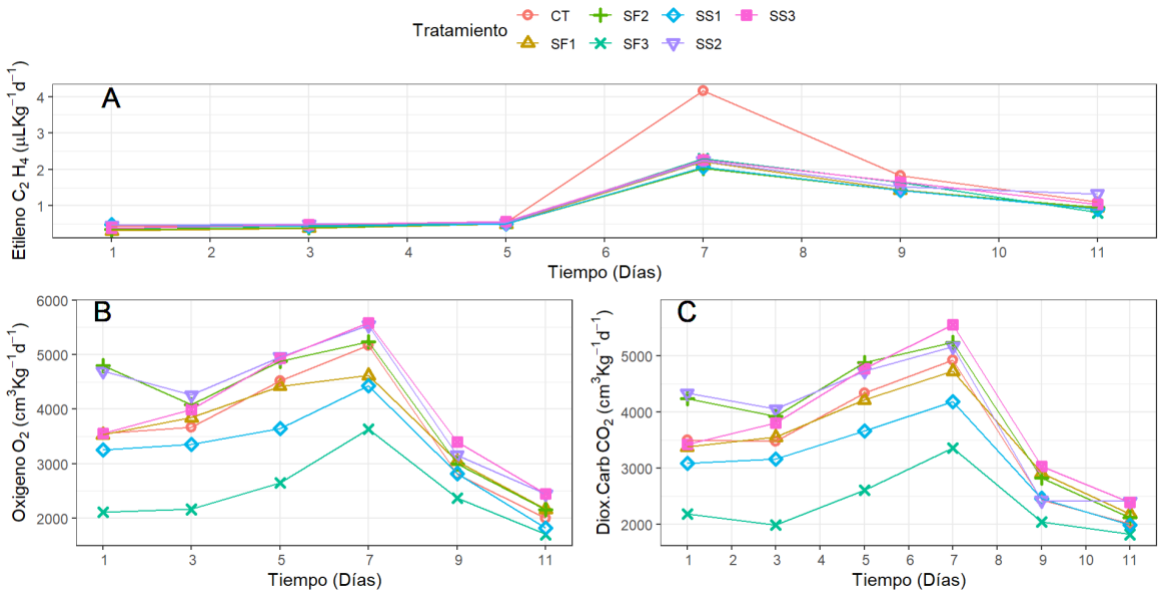

Figura 2. (**A**) Tasa de generación de etileno (C_2H_4), (**B**) tasa de consumo de oxígeno (O_2), y (**C**) tasa de producción de dióxido de carbono (CO_2) en tallos florales de rosa cv. Brigthon en plantas sometidas a tratamientos con y sin silicio. SS3, SF2 y SS2.

CT = Control, SF1 = Silicio 1 foliar, SF2 = Silicio 2 foliar, SF3 = Silicio 3 foliar, SS1 = Silicio 1 al suelo, SS2 = Silicio 2 al suelo, SS3 = Silicio 3 al suelo.

1.4.3 Caída de pétalos

La caída de pétalos es uno de los factores más importantes dentro de la duración de vida en florero de las rosas, para este caso el tratamiento de silicio foliar 1 (SF1) tiene el mejor comportamiento entre todos los tratamientos con 1,25 pétalos caídos en los 14 días de evaluación, seguido de los silicios aplicados al suelo 3 y 2 (SS3 y SS2) con 1,75 y 2 pétalos caídos respectivamente, mientras que el tratamiento control y el silicio foliar 2 son los tratamientos con más pétalos caídos con 2,5 y 2,25 respectivamente, durante la evaluación.

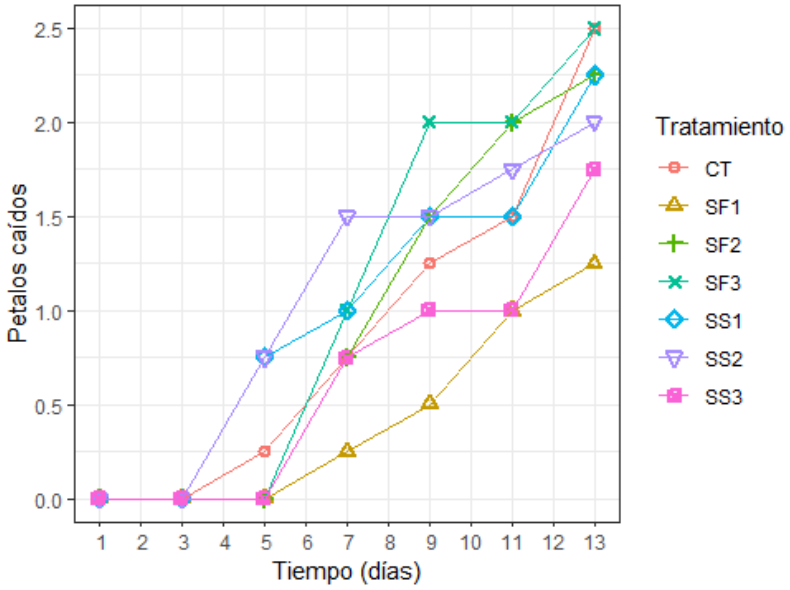

Figura 3. Cantidad promedio de pétalos caídos en tres tallos florales de rosa cv. Brigthon durante la evaluación poscosecha de plantas sometidas a la aplicación precosecha de silicio. CT = Control, SF1 = Silicio 1 foliar, SF2 = Silicio 2 foliar, SF3 = Silicio 3 foliar, SS1 = Silicio 1 al suelo, SS2 = Silicio 2 al suelo, SS3 = Silicio 3 al suelo.

1.4.4 Determinación del porcentaje de afectación por botritis

En la figura 4A se observa la distribución de la probabilidad de incidencia de moho gris, causado por botritis (*Botrytis cinerea)*; en donde, cuanto más oscura la tonalidad del color de la celda, menor probabilidad de afectación por la enfermedad en términos de la lesión en el pétalo de la flor. De acuerdo con lo anterior, es poco probable detectar la aparición de botritis en los días 1, 3 y 5 de evolución. Entre tanto, en el día 7 empieza la identificación de síntomas visuales de la infección, especialmente en el tratamiento control y en SF2; en el día 9, se detecta con una mayor probabilidad (56%) en el control y 21% en SF3; al día 11, es altamente probable en un 79% que en el control se puedan presentar lesiones en los pétalos por la enfermedad en estudio, medianamente probable en SF1 y SS2, poco probable en SF2 y SS3 e improbable en SS1, con tan solo un 6%. En el último día de evaluación es completamente probable que el control presente daños por botritis, medianamente probable con SF1, SF2, SF3, SS2 y SS3, y poco probable en SS1. En la figura 4B se puede observar la evolución de la severidad de la enfermedad durante el tiempo de evaluación, en donde el tratamiento CT (control) termina en la última medición con el valor más alto (1,5), mientras que SS1 muestra el valor más bajo (0,25).

A **B**

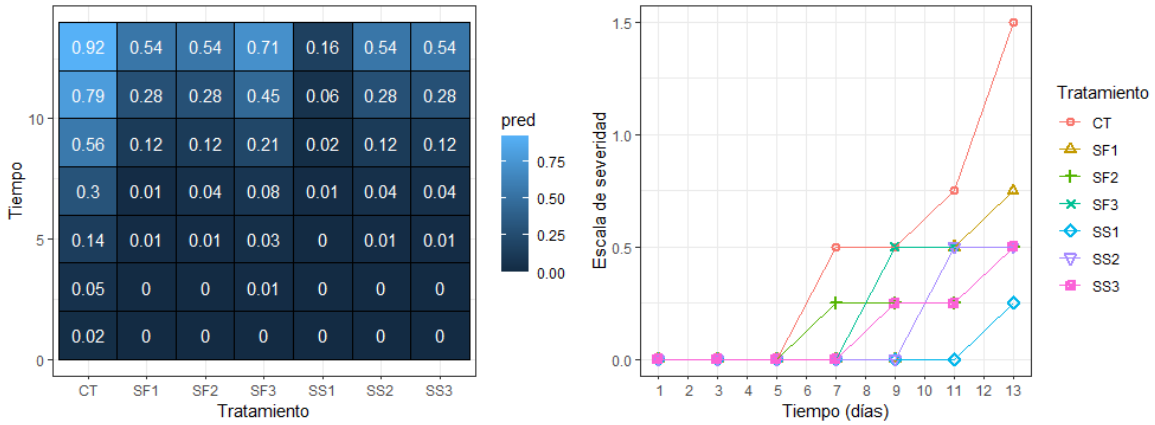

Figura 4. (A) Probabilidad de incidencia y (B) severidad de botritis en pétalos de rosa cv. Brigthon en plantas sometidas a la aplicación de silicio en precosecha durante el tiempo de evaluación.

1.5 Discusión

La cosecha y el almacenamiento de las flores frescas de corte implica su deterioro, debido a que se trata de un producto perecedero, en el cual el metabolismo se mantiene activo, generando fenómenos como la pérdida de biomasa (Geerdink *et al*., 2020), lo que se corrobora en esta investigación. Sin embargo, no se encontraron resultados concluyentes sobre la disminución de masa fresca, puesto que no se obtuvo diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos con el uso de silicio, en comparación con el control. Estos resultados difieren de los hallados por Jamali y Rahemi (2011), quienes reportan menos pérdida de masa fresca en tallos florales de clavel tratados con silicio, en dosis de 100, 150 y 300 mg L^{-1}; al igual que, los resultados reportados por El-Serafy (2019) y Geerdink *et al*. (2020) en rosa cvs Vega y Gold Star, que coinciden en que el silicio en aplicación foliar o al suelo reduce la pérdida de masa fresca y aumenta la masa seca de la rosa luego de su corte.

En la planta el Si es transportado vía xilema por el corriente de transpiración, mientras que inicialmente es absorbido por las raíces vía transportadores tipo Lsi1 o incluso a través de acuaporinas (El-Serafy, 2019; Hodson & Sangster, 1988). En la planta estimula respuestas frente al estrés hídrico, por medio del aumento de la síntesis de enzimas antioxidantes, como catalasa y ascorbato peroxidasa, que generan menor concentración de ROS y, por ende, menor degradación de las membranas y mayor capacidad de retención de agua por parte de las células (El-Serafy, 2019; Seyed *et al*., 2023).

Después de la cosecha del tallo floral, este es expuesto a determinado nivel de estrés. La rosa cv. Vendela es altamente productora de etileno y genera un pico de emisión a partir del octavo día, el cual se mantiene hasta el día 13 (Barón *et al*. 2021). En la presente investigación se obtuvo un comportamiento similar con la rosa cv. Brigthon, con un pico de producción de etileno alrededor del séptimo día de vida en florero sin embargo; este pico no se mantiene sino que cae drásticamente, debido posiblemente a la senescencia de las

flores, lo que podría considerarse que dicha senescencia en cv. Brigthon podría ser más prematura que en cv. Vendela evaluado por Barón *et al*. (2021). Con la aplicación foliar de las tres fuentes de silicio utilizadas y una de ellas aplicada al suelo (SS1) se obtuvieron diferencias estadísticas significativas en la generación del etileno, minimizando su evolución a través del tiempo de evaluación.

Estos resultados demuestran que la aplicación de Si en precosecha permite disminuir la generación de etileno en la vida en florero de la rosa de corte cv. Brigthon. De manera similar a los resultados de Jamali y Rahemi (2011); en cuya investigación usaron una solución nutritiva de silicio en forma de silicato de potasio en la poscosecha de clavel, en dosis de 100, 150 y 300 mg L^{-1}, y encontraron una reducción significativa en la producción de etileno frente al control, asociando este hallazgo a una mayor longevidad floral.

Entre tanto, el corte del tallo floral induce a un periodo de estrés, en función del daño mecánico y la falta de agua; lo que, a su vez, genera senescencia, puesto que se incrementa la producción de ROS y ocurre peroxidación de las membranas (El-Serafy, 2019; Geerdink *et al*., 2020). Así mismo, se aumenta la generación de etileno y por ende la respiración para generar energía de mantenimiento, en razón a que la fotosíntesis está siendo afectada (Barón *et al.*, 2021). En este sentido, en la presente investigación, la evolución de O_2 y CO_2 mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos con Si, pero no frente al control, en donde la respiración del tratamiento SF3 fue significativamente menor frente a los tratamientos SS3, SF2 y SS2. Sin embargo, Anese *et al*. (2022) reportan que la aplicación precosecha de Si en manzano puede acelerar la respiración del fruto en la poscosecha, debido al incremento en el metabolismo fotosintético y la transpiración de la planta. Por lo que, aún no hay un consenso del efecto de la aplicación de Si sobre la respiración.

Es bien sabido que la reducción de etileno es uno de los factores en el mantenimiento de la calidad floral y, por tanto, se retrasa la caída de los pétalos durante la vida en florero, tal como lo relatan Barón *et al*. (2021) en rosa de corte cv. Vendela, la cual es susceptible a la acción del etileno, con abscisión de los pétalos como efecto principal. En la presente investigación, la aplicación de Si, independientemente de la forma de aplicación y de la concentración empleada, disminuyó el pico climatérico de etileno, en comparación con el control. Aunque existe evidencia que el Si puede indirectamente inhibir la síntesis de etileno en condiciones de estrés biótico (Gao *et al*., 2022), aún no hay claridad de este mecanismo en la disminución de la producción de etileno en la senescencia. Como la senescencia de flores de corte se puede ralentizar con el aumento en la producción de moléculas detoxificadoras de ROS (Reid y Jiang, 2022) y, una de las funciones del Si es promover la síntesis de enzimas antioxidantes (Kim *et al*., 2017), es probable que la senescencia de la rosa var. 'Brigthon' se viera disminuida con la aplicación de Si, por su incidencia sobre la producción del etileno. Con la aplicación foliar de Si en clavel, Jamali y Rahemi (2011) también obtuvieron menor producción de etileno en la poscosecha de esta especie.

Aunque para la variable caída de pétalos se llevó a cabo un conteo sin análisis estadístico, tan solo uno de los tratamientos con Si se mantuvo similar al control, mientras que los demás tratamientos presentaron números menores, con el mejor resultado para el

tratamiento con silicio de la fuente 1 aplicado de forma foliar (SF1), seguido de la aplicación edáfica de la fuente 3 (SS3). Según Barón *et al*. (2021), la caída de pétalos está relacionada con la producción de etileno, como indicador de la senescencia floral. Así mismo, Geerdink *et al*. (2020) reportaron que en rosa cv. Vega el silicio mejora el estado hídrico de los pétalos, al aumentar la turgencia y disminuir la pérdida de agua en el tiempo. Por lo que el Si, al disminuir la producción de etileno, retrasaría la caída de pétalos en flores de rosa var. 'Brigthon'.

De acuerdo con Opfergelt *et al.* (2008), en banano, especie conocida como acumuladora de Si, también se ha podido observar que dicho elemento disminuye la producción de etileno. Por lo que Nikagolla *et al*. (2019) sugieren que el tratamiento con Si se puede utilizar como una alternativa al uso de fungicidas en el control de las pudriciones fúngicas posteriores a la cosecha. Para los autores, dicho tratamiento genera beneficios adicionales, como mayor firmeza del fruto y retraso en la maduración, con disminución estadísticamente significativa en la producción de CO_2 y de etileno.

La disminución de síntesis de etileno retarda los síntomas de moho gris en rosa; al respecto, Ha *et al.* (2022) con el tratamiento de 1-MCP consiguieron atrasar la aparición de botritis hasta en ocho días después de su inoculación, lo que confirma la relación directa entre la evolución de la hormona y el daño en los pétalos por la enfermedad. Además, el silicio en rosa cv. Smart aumentaría la expresión del gen *GLS5*, involucrado en la deposición de calosa en la pared celular, lo que, junto con la acumulación de silicio en el apoplasto, genera una barrera que limita la expansión del mildeo polvoso *(Podosphaera pannosa)* (Shetty *et al*., 2021), lo que también podría limitar la infección por botritis. En este experimento se observó que todos los tratamientos con Si permitieron disminuir los niveles de severidad de moho gris y la probabilidad de su aparición durante el tiempo de evaluación; entre ellos, el tratamiento SS1 mostró pétalos más sanos y menor probabilidad de infección.

Estos resultados con Si aplicado al suelo podrían estar relacionados con su absorción y translocación en la raíz, lo que en diversas especies ocurre a través de los transportadores de membrana Lsi1 ubicados en la raíz, siendo los más eficientes y los Lsi2 ubicados en raíces y hojas (Kaur y Greger, 2019). Aunque en la literatura consultada aún no hay evidencia de tales transportadores en plantas de rosa, la tendencia observada en los resultados de la presente investigación si podría estar relacionada con la actividad de los transportadores, en razón a que se encontró un mejor efecto del silicio cuando aplicado al suelo en comparación con la aplicación foliar: lo que concuerda con los resultados obtenidos por Geerdink *et al*. (2020). También, el Si puede estimular respuestas de la planta como la activación de genes frente a factores bióticos y abióticos adversos que ocasionan estrés oxidativo en las células (Ranjan *et al*., 2021).

En conclusión, con la aplicación de Si en precosecha no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos sobre las variables masa fresca y respiración. Sin embargo, la aplicación del elemento, especialmente al suelo, disminuyó la producción de etileno y, en consecuencia, redujo la incidencia y severidad del moho gris en los tallos florales de rosa de corte cv. Brigthon. La disminución en la producción de la

fitohormona también está asociada con la menor pérdida de pétalos observadas en los tratamientos con Si, en comparación con el tratamiento testigo.

1.6 Referencias

Able, A. J., Smyth, H., & Joyce, D. (2014). Postharvest physiology and volatile production by flowers of *Ptilotus nobilis*. Postharvest biology and technology, 88, 61-71. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.10.002

Anese, R. D. O., Monteiro, T. M., Pless, G. Z., Brackmann, A., Thewes, F. R., & Wendt, L. M. (2022). Pre-harvest silicon spraying: Impact on decay, metabolism, and overall quality of 'Galaxy' apples after harvest and cold storage. *Scientia Horticulturae*, 301, 111122. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111122

Aziz, M. M., Rashid, S., Kousar, H., Hussain, R., & Saeed, T. (2021). impact of various preservative solutions on vase life and post-harvest quality of cut roses: Ayub Agricultural Research Institute, Faisalabad, Pakistan. Pakistan Journal of Agriculture, Agricultural Engineering and Veterinary Sciences, 37(2), 71-78. https://doi.org/10.47432/2021.37.2.1

Barón Gamboa, F. (2018). *Evaluación del efecto de la aplicación en postcosecha del fungicida Pyraclostrobin sobre la vida en florero de la Rosa (Rosa sp.), variedad Vendela.* Universidad Nacional de Colombia.

Baron, F., Mendoza, R., Melo, S.E. *et al*. Evaluation and representation of ethylene effect on vase life and quality of rose (*Rosa hybrida*) cv. Vendela. Acta Physiol Plant 43, 161 (2021). https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1007/s11738-021-03332-z

Bika, R., Palmer, C., Alexander, L., & Baysal-Gurel, F. (2020). Comparative Performance of Reduced-risk Fungicides and Biorational Products in Management of Postharvest Botrytis Blight on Bigleaf Hydrangea Cut Flowers. HortTechnology, 30(6), 659-669.

Boldt, J. K., & Altland, J. E. (2021). Petunia (*Petunia x hybrida*) cultivars vary in silicon accumulation and distribution. HortScience, 56(3), 305-312.

Castellanos, D. A., Mendoza, R., Gavara, R., & Herrera, A. O. (2017). Respiration and ethylene generation modeling of "Hass" avocado and feijoa fruits and application in modified atmosphere packaging. *International Journal of Food Properties*, *20*(2), 333-349.

Da Costa, L. C., de Araujo, F. F., Ribeiro, W. S., de Sousa Santos, M. N., & Finger, F. L. (2021). Postharvest physiology of cut flowers. Ornamental Horticulture, 27, 374-385.

De Mendiburu, Felipe (2009). Una herramienta de analisis estadistico para la investigacion agricola. Tesis. Universidad Nacional de Ingenieria (UNI-PERU).

Dik, A. J., & Wubben, J. P. (2007). Epidemiology of *Botrytis cinerea* diseases in greenhouses. In Botrytis: biology, pathology and control (pp. 319-333). Springer, Dordrecht.

El-Serafy, R. S. (2019). Silica nanoparticles enhances physio-biochemical characters and postharvest quality of *Rosa hybrida* L. cut flowers. Journal of Horticultural Research, 27(1).

Faziha, i. n., Ariff, m. m., fahim, n., Ezzry, p. m. n., & Suhaizan, L. (2019). Potential of silicon nutrient in reducing fungal disease in red-fleshed dragon fruit. Malaysian Applied Biology, 48(1), 43-49.

Friedrich, Sarah & Brunner, Edgar & Pauly, Markus, 2017. "Permuting longitudinal data in spite of the dependencies," Journal of Multivariate Analysis, Elsevier, vol. 153(C), pages 255-265. DOI: 10.1016/j.jmva.2016.10.004

Gao, H., Wu, X., Yang, X., Sun, M., Liang, J., Xiao, Y., & Peng, F. (2022). Silicon inhibits gummosis by promoting polyamine synthesis and repressing ethylene biosynthesis in peach. *Frontiers in Plant Science*, 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.986688

Geerdink, G. M., Orsi, B., Tezotto-Uliana, J. V., Pessoa, C. O., Sasaki, F. F. C., & Kluge, R. A. (2020). Pre-harvest silicon treatment improves quality of cut rose stems and maintains postharvest vase life. Journal of Plant Nutrition, 43(10), 1418–1426. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1730894

Gómez Rodríguez, T. (2013). *Caracterización de aislamientos de Botrytis cinerea de rosa en la Sabana de Bogotá* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Ha, S. T. T., Kim, Y. T., Jeon, Y. H., Choi, H. W., & In, B. C. (2021b). Regulation of *Botrytis cinerea* Infection and Gene Expression in Cut Roses by Using Nano Silver and Salicylic Acid. Plants, 10(6), 1241.

Ha, S. T. T., Kim, Y.-T., Yeam, I., Choi, H. W., & In, B.-C. (2022). Molecular dissection of rose and *Botrytis cinerea* pathosystems affected by ethylene. Postharvest Biology and Technology, 194. https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1016/j.postharvbio.2022.112104

Ha, S.T.T., Choi, B.S., In, B.C., 2021a. Nature and regulation of *Botrytis cinerea* in Rosa hybrida. Flower Res. J. 29, 129–137. https://doi.org/10.11623/frj.2021.29.3.02.

Ha, S.T.T., Lim, JH. & In, BC. Simultaneous Inhibition of Ethylene Biosynthesis and Binding Using AVG and 1-MCP in Two Rose Cultivars with Different Sensitivities to Ethylene. J Plant Growth Regul 39, 553–563 (2020). https://doi.org/10.1007/s00344-019-09999-6

Hashemabadi D, Liavali MH, Kaviani B, Mousavi M, Keyghobadi S, Zahiri S (2014) Effect of nano-silver and boric acid on extending the vase life of cut rose (*Rosa hybrida L*.). J Environ Biol 35:833–838

Hodson, M. J., & Sangster, A. G. (1988). Silica deposition in the inflorescence bracts of wheat (*Triticum aestivum*). I. Scanning electron microscopy and light microscopy. Canadian Journal of Botany, 66(5), 829–838. https://doi.org/10.1139/b88-121

Højsgaard, S., Halekoh, U., & Yan, J. (2006). The R package geepack for generalized estimating equations. Journal of statistical software, 15, 1-11. doi:10.18637/jss.v015.i02

Huang S, Gong B, Wei F, Ma H (2017) Pre-harvest 1-methylcyclopropene application affects post-harvest physiology and storage life of the cut rose cv. Carola. Hortic Environ Biote 58:144–151. https://doi.org/10.1007/s1358 0-017-0081-9

Jamali, B., & Rahemi, M. (2011). Carnation flowers senescence as influenced by nickel, cobalt and silicon. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 5(15).

Jamali, B., & Rahemi, M. (2011). Carnation flowers senescence as influenced by nickel, cobalt and silicon. Journal of Biological and Environmental Sciences, 5(15).

Kim, Y. H., Khan, A. L., Waqas, M., & Lee, I. J. (2017). Silicon Regulates Antioxidant Activities of Crop Plants under Abiotic-Induced Oxidative Stress: A Review. *Frontiers in Plant Science*, 8, 510. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510

Li, Y., Li, L., Wang, S., Liu, Y., Zou, J., Ding, W. & Shen, W. (2021). Magnesium hydride acts as a convenient hydrogen supply to prolong the vase life of cut roses by modulating nitric oxide synthesis. Postharvest Biology and Technology, 177, 111526. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111526

Mazrou, R. M., Hassan, S., Yang, M., & Hassan, F. A. (2022). Melatonin Preserves the Postharvest Quality of Cut Roses through Enhancing the Antioxidant System. Plants, 11(20), 2713. https://doi.org/10.3390/plants11202713

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección de cadena agrícola y forestales. Cadena de flores, follajes y ornamentales. Diciembre (2020). https://sioc.minagricultura.gov.co/Flores/Documentos/2020-12-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección de cadena agrícola y forestales. Gobierno Nacional celebra con los floricultores las cifras históricas de San Valentín. Febrero (2022). https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Gobierno-Nacional-celebra-con-los-floricultores-las-cifras-históricas-de-San-Valent%C3%ADn.aspx

Mitani, N., Ma, J. F., & Iwashita, T. (2005). Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa L*.). Plant and cell physiology, 46(2), 279-283.

Nikagolla, N. G. D. N., Udugala-Ganehenege, M. Y., & Daundasekera, W. A. M. (2019). Postharvest application of potassium silicate improves keeping quality of banana. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 94(6), 735-743.

Opfergelt, S., Delvaux, B., André, L., & Cardinal, D. (2008). Plant silicon isotopic signature might reflect soil weathering degree. *Biogeochemistry*, *91*, 163-175. https://doi.org/10.1007/s10533-008-9278-4

Reid, M.S. & Jiang, C.-Z. (2012). Postharvest Biology and Technology of Cut Flowers and Potted Plants. In *Horticultural Reviews*, J. Janick (Ed.). https://doi.org/10.1002/9781118351871.ch1

Seyed Hajizadeh, H., Azizi, S., Rasouli, F., & Kaya, O. (2023). Evaluation of nano-silicon efficiency on compatible solutes and nutrient status of Damask rose affected by in

vitro simulated drought stress. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 10(1), 22. https://doi.org/10.1186/s40538-023-00397-5

Shetty, R., Jensen, B., Shelton, D., Jørgensen, K., Pedas, P., & Jørgensen, H. J. L. (2021). Site-specific, silicon-induced structural and molecular defence responses against powdery mildew infection in roses. Pest Management Science, 77(10), 4545–4554. https://doi.org/10.1002/ps.6493

Simko I, Piepho HP. The area under the disease progress stairs: calculation, advantage, and application. Phytopathology. 2012 Apr;102(4):381-9. doi: 10.1094/PHYTO-07-11-0216. PMID: 22122266.

Sun, J., Jameson, P. E., & Clemens, J. (1999, November). Water relations and stamen abscission in cut flowers of selected myrtaceae. In VII International Symposium on Postharvest Physiology of Ornamental Plants 543 (pp. 185-189).

Wang, L., Dong, M., Zhang, Q., Wu, Y., Hu, L., Parson, J. F., ... & Xiao, S. (2020). Silicon modulates multi-layered defense against powdery mildew in Arabidopsis. Phytopathology Research, 2(1), 1-14.

Wu, Y., Zuo, L., Ma, Y., Jiang, Y., Gao, J., Tao, J., & Chen, C. (2022). Protein Kinase RhCIPK6 Promotes Petal Senescence in Response to Ethylene in Rose (*Rosa Hybrida*). Genes, 13(11), 1989. https://doi.org/10.3390/genes13111989

2. Capítulo 2: Efecto de la aplicación foliar y edáfica de silicio sobre el estatus nutricional de rosa (*Rosa* x *hybrida* L.) cv. 'Brighton'

Machado López Eduard[1] – Stanislav Magnitskiy [2] - Flórez Roncancio Víctor Julio[3]

[1] Departamento de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9388-7370

[2] Ph.D Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia svmagnitskiy@unal.edu.co

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3715-1932

[3] Ph.D Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia vjflorezr@unal.edu.co

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3081-2400

2.1 Resumen

La rosa es la flor de corte más comercializadas y producida en el mundo, donde Colombia ocupa el segundo lugar en la exportación de flores. El silicio (Si) es un elemento benéfico que se utiliza en diferentes cultivos para tolerar condiciones de estrés. Sin embargo, pocos estudios han demostrado el efecto del Si y la forma de aplicación en la nutrición mineral de plantas bajo condiciones ideales. Por lo tanto, se evaluó los efectos de diferentes métodos de aplicación de Si sobre la absorción de nutrientes en los órganos del tallo floral de rosa 'Brighton'. Para ello, se aplicó Si en forma foliar (SF) y al suelo (SS) de tres fertilizantes de K_2SiO_3 que contenían diferentes concentraciones de Si (SF1-3 y SS1-3). En general, la aplicación de Si, independientemente del método, no afecto la concentración en hojas, tallo y botón floral de todos los macronutrientes (N, P, K, Ca^{2+}, Mg^{2+}, S). La aplicación de SF3 redujo la concentración de Fe, sin embargo, este efecto fue más marcado cuando se aplicó SS2. Efecto similar se observó con el Cu. Tanto SF como SS incrementó la concentración de Mn, pero se vio más pronunciado cuando se aplicó SS1 y SS2. El Zn aumentó únicamente con la aplicación de SS1. El B no presentó cambios en la concentración. El S disminuyó con la aplicación de SS1 y SS2. La concentración de Si

foliar no se vio afectada con la aplicación exógena de Si. Por lo tanto, la aplicación de Si, especialmente cuando se aplicó al suelo, afectó la absorción y translocación únicamente de algunos microelementos y S en rosa var. 'Brighton'.

Palabras claves: micronutrientes, tallo floral, absorción de nutrientes, nutrición vegetal, concentración foliar.

2.2 Introducción

La producción y comercialización en flores de corte poseen un importante valor económico en los diferentes mercados globales, donde la rosa (*Rosa x hybrida* L.) es el principal cultivo exportable de flores de corte a nivel mundial (Faust y Dole, 2021). Colombia se ubica en el segundo lugar en la exportación de flores de corte y botones florales, dentro de los cuales la rosa es una de las principales flores de exportación (ITC, 2023), y contribuye al desarrollo económico de la región al generar anualmente más de 200 mil empleos formales (MADR, 2022).

La alta demanda de la rosa a nivel mundial implica desarrollar un sistema de cultivo con un manejo agronómico intensivo, para así mantener grandes producciones durante las temporadas de mercado, por lo que garantizar una buena nutrición mineral es fundamental (Cabrera *et al*., 2009; Darras, 2020). Sin embargo, existen factores ambientales que afectan la fertilización en la rosa, como las características fisicoquímicas del suelo, la humedad relativa y el pH de la solución nutricional (Roosta y Rezaei, 2014). La alta y moderada humedad relativa ocasiona menor acumulación de calcio en los pétalos (menor relación K/ Ca), lo que reduce la vida poscosecha y calidad ornamental de las rosas (Torre *et al*., 2001). Además, la deficiencia de nitrógeno durante el desarrollo vegetativo de rosas mostró plantas más asimétricas, menos vigorosas y brotación heterogénea (Huché-Thélier *et al*., 2011). Por otro lado, no aplicar hierro, zinc, manganeso y cobre dentro de la solución nutricional de rosa conlleva a una menor elongación y engrosamiento de los tallos, mayores síntomas de deficiencia nutricional, y mayor infección de *Sphaerotheca pannosa* (Khoshgoftarmanesh *et al*., 2008), lo que resalta la importancia de los micronutrientes en el óptimo desarrollo de las rosas. Por estas razones, es necesario buscar herramientas que optimicen la absorción y translocación de nutrientes en el cultivo de rosa. La aplicación de silicio ha demostrado el potencial de aumentar la disponibilidad y absorción de nutrientes en las raíces a través de mecanismos complejos (Pavlovic *et al*., 2021).

El silicio (Si) es considerado un elemento benéfico para el crecimiento de las plantas, las cuales lo absorben de la solución del suelo en forma de ácido monosilícico [H_4SiO_4] (Ma *et al*., 2023). En la planta, el Si se polimeriza en gel de sílice [$SiO_2 \cdot H_2O$] y se deposita en los espacios intercelulares de las raíces y hojas (Ma y Yamaji, 2006). La concentración de Si varía considerablemente entre especies de plantas, con valores que oscilan entre 0.1% y 16% de Si en peso seco (Collin *et al*., 2012; Kaur y Greger, 2019).

Los efectos benéficos del Si están directa e indirectamente relacionados en el crecimiento y los procesos fisiológicos de las plantas, principalmente bajo estrés biótico y abiótico (Ma

et al., 2023). En especies de rosa, aplicaciones de Si mostraron una mayor tolerancia al estrés salino (Reezie *et al*., 2009) y déficit hídrico (Farahani *et al*., 2021), y menor incidencia de mildéu polvoso (Albornoz *et al*., 2016). Por otro lado, el Si puede afectar la absorción y distribución de varios nutrientes minerales en plantas no estresadas (Pavlovic *et al*., 2021). Greger *et al*. (2018) evaluaron diferentes especies de importancia agronómica y encontraron que la interacción entre la aplicación de Si, y la absorción y translocación de macro y micronutrientes depende del tipo de suelo y la especie estudiada. Además, los niveles de Si endógenos pueden afectar la absorción de los nutrientes (Wiese *et al*, 2007), por lo que los métodos de aplicación de Si (absorción por la raíz o aspersión foliar) también podrían influenciar la toma de iones por parte de la planta (Hernández-Apaolaza *et al*., 2020). En plantas de papa no estresadas, aplicaciones de Si al suelo mostraron una mayor acumulación de P en las hojas en comparación con el Si vía foliar (Pilon *et al*., 2013). En rosa var. 'Snowflake', aplicaciones de Si por aspersiones foliares mejoraron la concentración de Ca, Mg, B y Mn en las hojas, en comparación con plantas no tratadas y con suministro de Si al suelo (Guio-Rodríguez *et al*., 2022). Por lo tanto, aplicaciones de Si podrían tener efecto en el estado nutricional de las plantas de rosa 'Brighton'.

Teniendo en cuenta la importancia en la producción de rosa a nivel nacional e internacional y el efecto beneficioso del Si en plantas, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación precosecha foliar y edáfica de tres fertilizantes de silicio sobre el contenido nutricional del tallo floral de rosa cv. 'Brighton'.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Material vegetal y localización

La investigación se realizó en la sabana de Bogotá, Cundinamarca, en una finca dedicada a la producción de flores de corte de exportación, ubicada al noroccidente de la sabana de Bogotá, en el municipio de El Rosal, Cundinamarca, ubicada a 4° 50' 45,402" latitud norte; 74° 14' 33,807" latitud Oeste entre la vía El Rosal – Subachoque, con temperaturas mínima y máxima de 8°C y 23°C, respectivamente, radiación PAR promedio de 280,6 µmol m^{-2} s^{-1}, y humedad relativa promedio mes máxima de 80% y mínima de 68%.

Los ensayos fueron conducidos en un invernadero tipo milenio con estructura metálica y cubierta de plástico convencional y sin aditamentos, con altura máxima de 6,80 m y altura laterales de 4,30 m. Se contó con un cultivo de rosa de siete años de la variedad 'Brighton' injertada sobre 'Natal Briar' (rosa amarilla), sembrada a una densidad de 7,2 plantas m^{-2} en camas de 32 x 0,9 m, considerando 178 camas por hectárea. En promedio, se aplicó un volumen de riego de 675 L $cama^{-1}$ por semana a través de riego por goteo, donde se aplicaba la solución nutricional (pH = 6,5). El manejo fitosanitario se realizó de acuerdo con la necesidad del cultivo bajo unos parámetros de medición semanal y seguimiento constante. Estos manejos son reserva de la finca.

2.3.2 Diseño Experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar, en donde se establecieron siete tratamientos, y en seis de ellos se aplicó silicio en forma de silicato de potasio de tres procedencias comerciales distintas, de acuerdo con lo descrito en la Tabla 4. Cada tratamiento se acondicionó en una nave de invernadero constituida por ocho camas, y en cada nave se dispuso de cuatro repeticiones, estando conformada la unidad experimental por diez plantas elegidas al azar en la parte media de las camas, las cuales tenían mínimo dos tallos florales de dos semanas y fueron debidamente rotuladas. A las dos semanas después de la programación para la poda, se iniciaron las aplicaciones con frecuencia quincenal, hasta alcanzar cinco y posteriormente evaluar en poscosecha.

Tabla 4. Tratamientos utilizados en plantas de rosa cv. Brighton sometidas a aplicaciones de silicio foliar o edáfico.

Tratamiento*	Producto	Composición	Método de aplicación	Dosis ($mL\ L^{-1}$)
CT	Control		manejo convencional[1]	N/A
SF1	Fertilizante 1	Potasio soluble en agua 140 $g\ L^{-1}$ y silicio soluble en agua 322 $g\ L^{-1}$	Foliar[2]	1
SS1			Edáfico[3]	0,08
SF2	Fertilizante 2	Potasio soluble en agua 100 $g\ L^{-1}$ y silicio total 360 $g\ L^{-1}$	Foliar	1
SS2			Edáfico	0,08
SF3	Fertilizante 3	Potasio soluble en agua 170 $g\ L^{-1}$y silicio soluble en agua 330 $g\ L^{-1}$	Foliar	1
SS3			Edáfico	0,08

[1] fórmula de fertirriego estándar de la finca, sin aplicación de Si foliar o edáfico.
[2] aspersión a follaje (7 L por cama equivalente a 1.246 L ha^{-1}).
[3] aplicación al suelo (135 L por cama equivalente a 24.030 L ha^{-1}).
* Los tratamientos SF1 a SS3 recibieron el manejo tradicional de la finca más las aplicaciones foliar o edáfica de Si indicadas.

2.3.3 Contenido nutricional

Se determinó la concentración de nitrógeno , fósforo , potasio , calcio , magnesio , azufre, hierro, manganeso, zinc, cobre, boro y sodio en los tallos, hojas y botones florales cuando la flor alcanzó la madurez fisiológica y fue cosechada, ya que es allí donde la elongación de tallo se ve disminuida y la absorción de nutrientes aumenta alcanzando sus valores máximos (Cabrera y Solís, 2011). La concentración de silicio (Si) fue determinada en las hojas. Los análisis foliares fueron realizados en el laboratorio AGRILAB®, donde el N

orgánico se obtuvo por el método de Kjeldahl (ICONTEC, 1997), el P por medio de colorimetría (ICONTEC, 2001), y los contenidos de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Na y Si se obtuvieron por espectroscopía de absorción atómica según el patrón analítico de pureza de cada elemento. El contenido de S se determinó por método colorimétrico (ICONTEC, 2005), y el B se cuantificó según el método Azometina-H (ICONTEC, 2014). En la Tabla 5 se muestran los rangos de valores medios para cada elemento del cultivo de rosa para la etapa fenológica mencionada.

Tabla 5. Valores recomendados para concentraciones de nutrientes foliares en *Rosa* spp. cultivados en la Sabana de Bogotá. Tomado de Triana *et al*. (2006) y Franco-Hermida *et al*. (2013).

Elemento		Deficiente	Normal	Exceso
N	% *	< 2,5	3,00 – 5,00	> 5,00
P		< 0,2	0,2 – 0,3	> 0,4
K		< 1,2	1,6 – 2,5	> 2,5
Ca		< 0,8	1,00 – 2,00	-
Mg		< 0,25	0,3 – 0,4	-
S		-	0,15 – 0,25	-
Fe	mg kg $^{-1}$*	< 50	80 – 150	> 150
Mn		< 70	100 – 300	> 400
Cu		< 5	7 – 17	> 18
Zn		< 15	15 – 50	> 50
B		< 30	40 – 80	> 80

* Expresados en masa seca (MS)

2.3.4 Análisis estadístico

Para la explicación de los datos, se realizó un análisis de varianza con enfoque multivariado usando la función *manova ()* de la librería base de R, tomando como variables respuesta la concentración de los elementos en las unidades muestreadas. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza univariado por cada variable analizada para estudiar el efecto de los tratamientos sobre las mismas si es que existe. Finalmente, se realizó una prueba de comparación de medias Tukey usando la función *HSD.test* de la librería *agricolae*. Los gráficos se realizaron con la librería *ggplot2* con cada una de las variables analizadas, para observar los perfiles de translocación de cada elemento, discriminado por tratamiento y órgano de la planta.

2.4 Resultados

2.4.1 Macronutrientes

La concentración de nitrógeno en el botón floral, hojas y tallo no presentó diferencias estadísticas según el análisis de varianza univariado para todos los tratamientos (Figura 5). En general, la concentración de N de todos los tratamientos alcanzó una media aritmética de 3,30% ± 0,25, 1,87% ± 0,18, y 1,42% ± 0,20 para hoja, botón floral y tallo, respectivamente. La concentración de N en las hojas estuvo dentro los rangos óptimos reportados en el cultivo de rosa en la Sabana de Bogotá (Tabla 5). Por lo tanto, la aplicación de diferentes fertilizantes de Si foliar o edáfico no afectó la acumulación y translocación de este elemento.

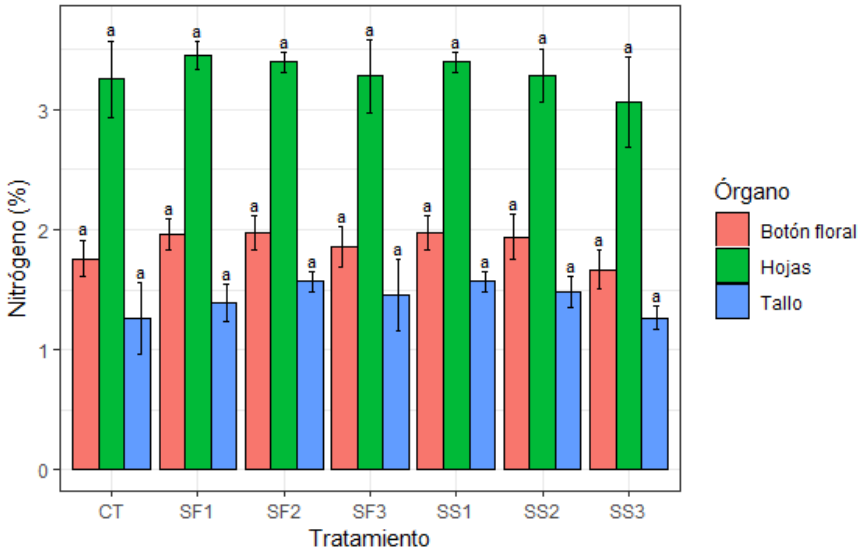

Figura 5. Concentración de nitrógeno (N) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4).

La acumulación nutricional de fosforo no presentó diferencias estadísticas para la concentración de P en hojas y tallo, lo cual mostró promedios de 0,31% ± 0,02 y 0,23 ± 0,03, respectivamente (Figura 6). Sin embargo, en botón floral se vio afectada estadísticamente la concentración de P por la aplicación de Si, donde el tratamiento con suministro del fertilizantes 2 foliar y fertilizante 3 edáfico obtuvieron los valores más altos con respecto a los demás tratamientos. El tratamiento SF2 (0,32%) fue un 16% mayor con respecto al SS2 (0,26%), por lo que aplicar este fertilizante de Si por vía foliar resultaría más efectivo en la translocación de P al botón floral. Por otro lado, SS2 fue el tratamiento que disminuyó en mayor magnitud la movilización de P al botón de la flora, por lo que aplicar por vía foliar el Si con el fertilizante 2, aumentaría la absorción de P en las plantas de rosa. Además, la concentración de P en hojas estuvo dentro del rango óptimo del cultivo de rosa en las zona de estudio (Tabla 5).

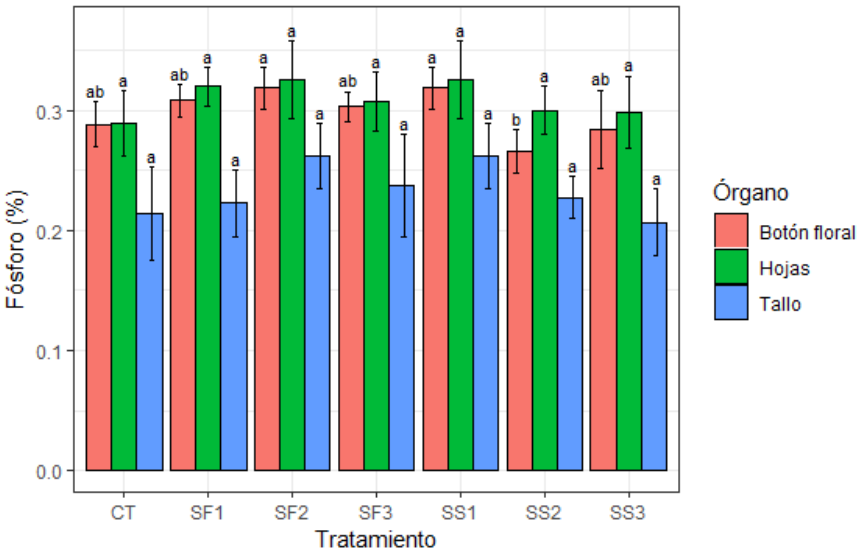

Figura 6. Concentración de fósforo (P) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

La concentración de potasio en tallo, hoja y botón no mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba ANOVA (Figura 7), por lo que alcanzó un promedio general de 1,08% ± 0,14, 2,19% ± 0,18, y 1,54% ± 0,11, respectivamente. Los datos de concentración en hoja de K estuvieron dentro de los rangos óptimos reportados para el cultivo de rosa en la Sabana de Bogotá (Tabla 5). Por lo tanto, a pesar de que los fertilizantes venían como silicatos de potasio, la aplicación de Si con diferentes dosis por vía foliar o edáfica no afectó la acumulación y translocación del K^+ en las plantas de rosa.

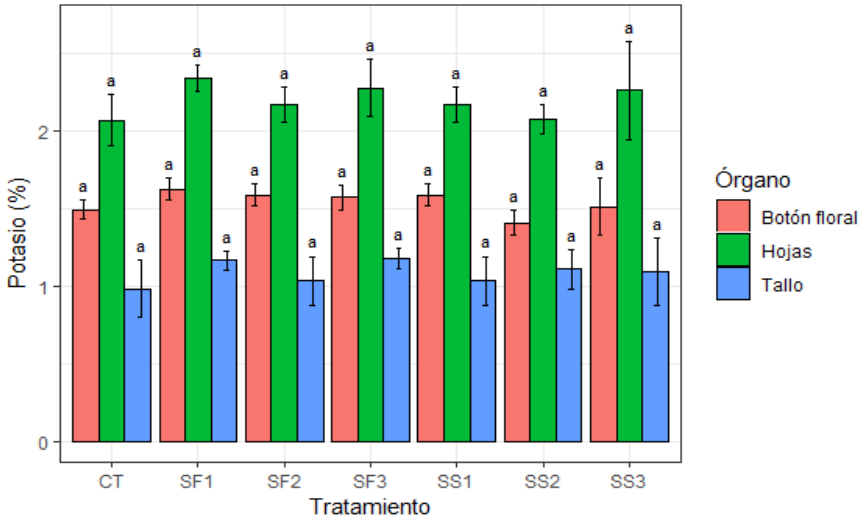

Figura 7. Concentración de potasio (K+) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4).

La concentración de calcio en los órganos de tallo, hoja y botón floral en rosa 'Brighton' no mostró diferencias estadísticas entre los métodos de aplicación y los fertilizantes de Si (Figura 8). Los valores promedio generales de la acumulación de Ca en todos los tratamientos alcanzaron 1,34% ± 0,16, 0,27% ± 0,03 y 0,21% ± 0,03 para hoja, tallo y botón floral, respectivamente. La concentración de Ca en hojas estuvo dentro los rangos óptimos para el cultivo de rosa (Tabla 5). Por ende, la aplicación de Si en diferentes dosis y métodos de aplicación no influyó en la acumulación de Ca en las plantas de rosa 'Brighton'.

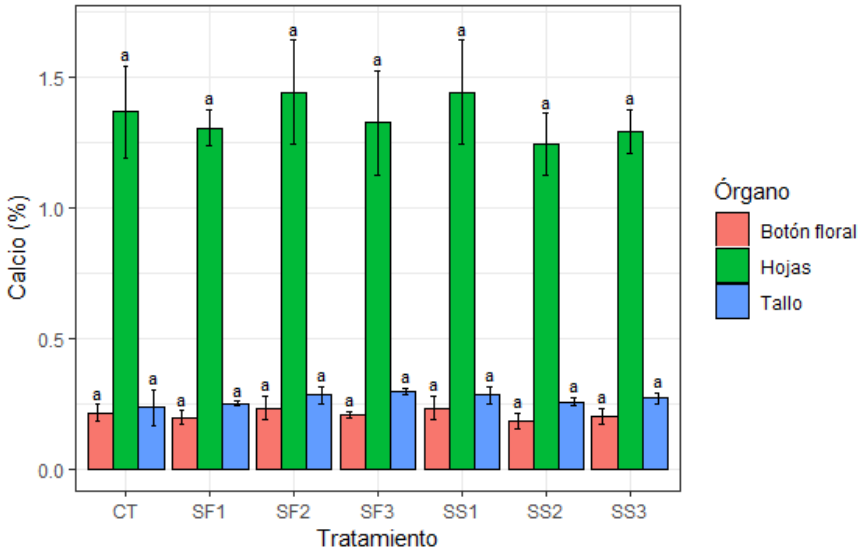

Figura 8. Concentración de calcio (Ca) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

La concentración de magnesio no mostró diferencias estadísticas para la acumulación en hojas y tallo, pero si en botón floral (Figura 9). Para hojas y tallo alcanzó un promedio de 0,29% ± 0,02 y 0,12% ± 0,02, respectivamente. La concentración de Mg en hojas se encontró dentro del valor óptimo para el cultivo de rosa cultivado en la zona de estudio (Tabla 5). La aplicación del fertilizantes 2 por vía edáfica (potasio soluble en agua 100 g L^{-1} y silicio total 360 g L^{-1}) disminuyó la acumulación de Mg en el botón floral en un 10,84% con respecto a los demás tratamientos, sin embargo, este efecto no se evidenció en cuando se aplicó por vía foliar.

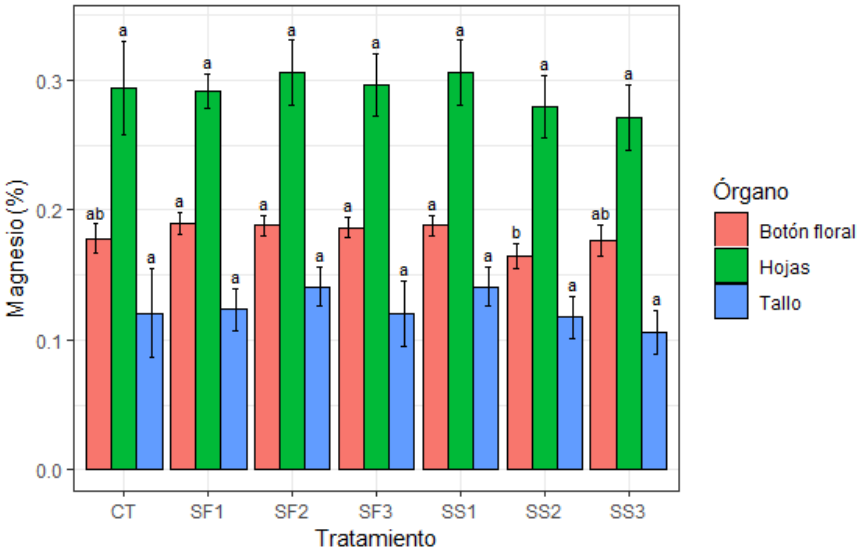

Figura 9. Concentración de magnesio (Mg) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

La acumulación de azufre se vio afectada en los botones florales de las plantas de rosa por la aplicación de Si, pero no en hojas y tallo (Figura 10). La aplicación del fertilizante 2 de Si disminuyó estadísticamente la concentración de S en el botón floral, en un 14.11% con respeto al promedio de los demás tratamientos. Los tratamientos CT, SF3 y SS3 tuvieron una ligera tendencia a disminuir. En hojas y tallo, se obtuvo un promedio de 0,33% ± 0,03 y 0,08% ± 0,01 para todos los tratamientos, respectivamente. La concentración de S en la hoja sobrepaso ligeramente el rango óptimo para el cultivo de rosa (Tabla 5).

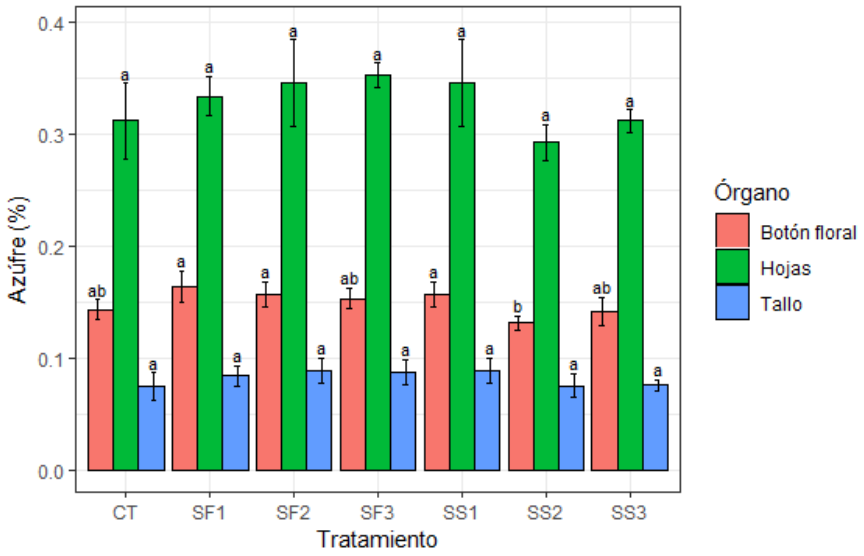

Figura 10. Concentración de azufre (S) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

2.4.2 Micronutrientes

La aplicación de Si afectó la concentración de hierro en los diferentes órganos de la planta de rosa cv. 'Brighton', según la prueba ANOVA (Figura 11). Independientemente del fertilizante y del método de aplicación, el Si disminuyó la concentración de Fe en hojas y tallo, especialmente con la aplicación al suelo. En hojas, el SS1 y el SS2 disminuyeron en 35,30% y 39,55% la concentración de Fe, respectivamente. Sin embargo, la concentración de Fe en la hoja se encontró dentro de los rangos óptimos reportados para el cultivo de rosa en la Sabana de Bogotá para todos los tratamientos, a excepción del control (Tabla 5). Asimismo, en el tallo se redujo en un 19,33% y 27,97% para los tratamientos SS1 y SS2, respectivamente. En el botón floral también se observó una disminución estadística con respecto a control pero solo en el tratamiento SS2. Por lo tanto, se nota una clara relación negativa entre el Si y el Fe en la fisiología nutricional de la planta de rosa.

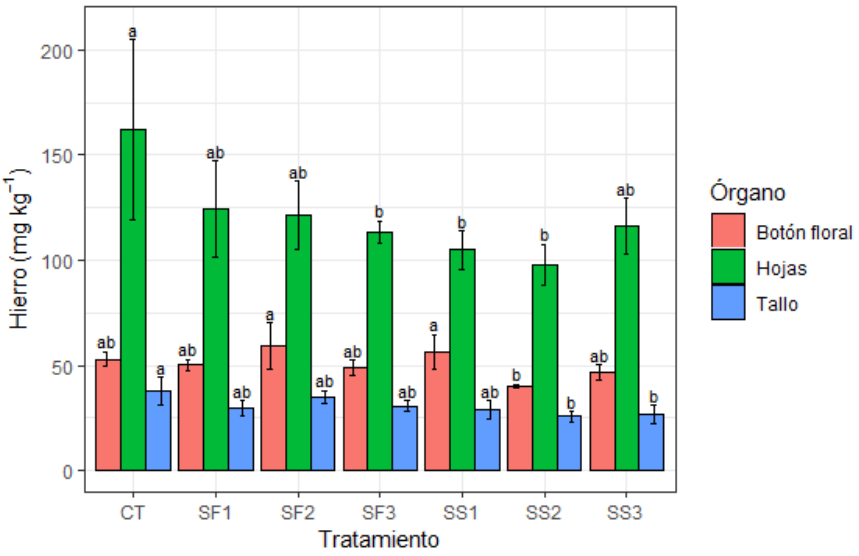

Figura 11. Concentración de hierro (Fe) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

En cuanto al manganeso, se obtuvo un efecto diferente al encontrado con el Fe, ya que la aplicación de Si, independientemente del fertilizante y método de aplicación, aumento la concentración de Mn en hojas y botones florales (Figura 12). Los fertilizantes 1 y 2 con aplicación edáfica (SS1 y SS2) obtuvieron los valores más altos de Mn foliar, aumentando un 201,91% y 179,83%, respectivamente; y, en el botón floral, se evidenció el mismo efecto. El valor en el tallo no presentó diferencias estadísticas entre los tratamientos, y alcanzó un promedio general de 9,23 ± 2,71 mg kg^{-1}. Por lo tanto, la aplicación de Si al suelo aumentó la absorción de Mn en las plantas de rosa, lo que significa mayor acumulación de Mn en el tejido foliar y, probablemente, mayor translocación de Mn hacia el botón floral.

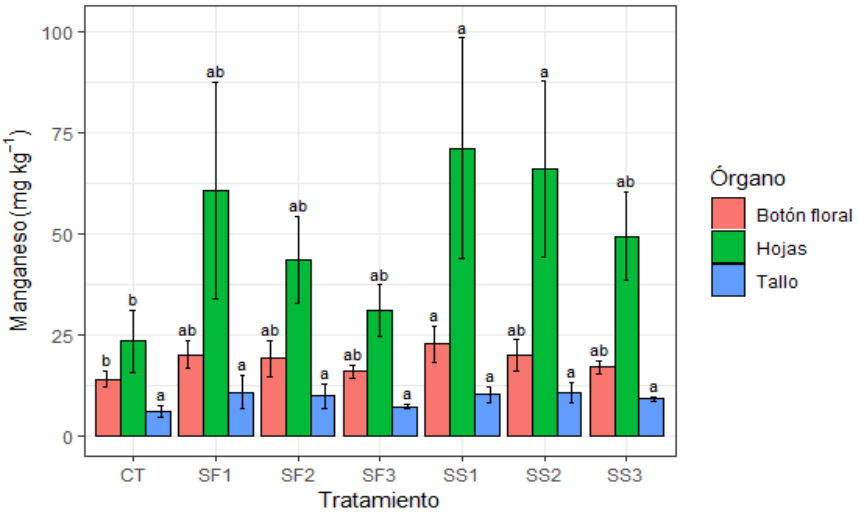

Figura 12. Concentración de manganeso (Mn) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

La concentración de cobre no presentó diferencias estadísticas entre los tratamientos en los órganos analizados y alcanzó un promedio general de 6,66 ± 0,89 y 7,55 ± 1,35 mg kg^{-1} en botón floral y hojas, respectivamente (Figura 13). En las hojas, el tratamiento SF1 aumentó estadísticamente la concentración de Cu en un 14,61% con respecto al control. Se observó que la concentración de Cu en hojas de todos los tratamientos se mantuvo dentro de los valores óptimos para el cultivo de rosa en la zona de estudio (Tabla 5). Por el contrario, la aplicación de Si al suelo del fertilizante 2 (SS2) disminuyó esta concentración.

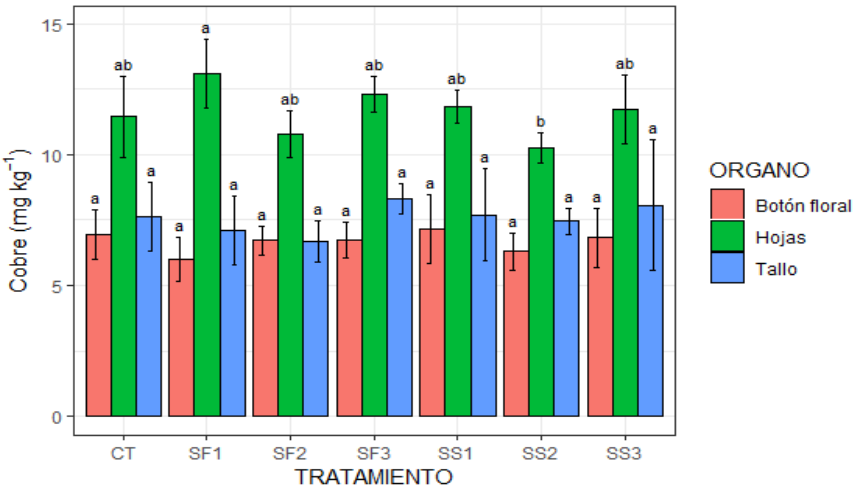

Figura 13. Concentración de cobre (Cu) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

La aplicación de Si no afectó estadísticamente la concentración de zinc en el tallo de las plantas de rosa, alcanzando el promedio general de 22,49 ± 3,86 mg kg^{-1} (Figura 14). Entre tanto, el tratamiento SS1 mostró mayor concentración de Zn en hojas (115,75 ± 16,62 mg kg^{-1}) y en botón floral (26,67 ± 2,24 mg kg^{-1}), con referencia a los demás tratamientos, siendo un 90,14% y 14,48% mayor, respectivamente, con relación al control. Este efecto no se vio cuando el fertilizante 1 se aplicó por vía foliar, por lo que la aplicación de Si al suelo de este fertilizante podría aumentar la absorción de Zn. Sin embargo, las plantas de rosa excedieron el rango óptimo de la concentración de Zn en hojas para todos los tratamientos (Tabla 5), pero no presentaron síntomas de toxicidad por causa de este elemento.

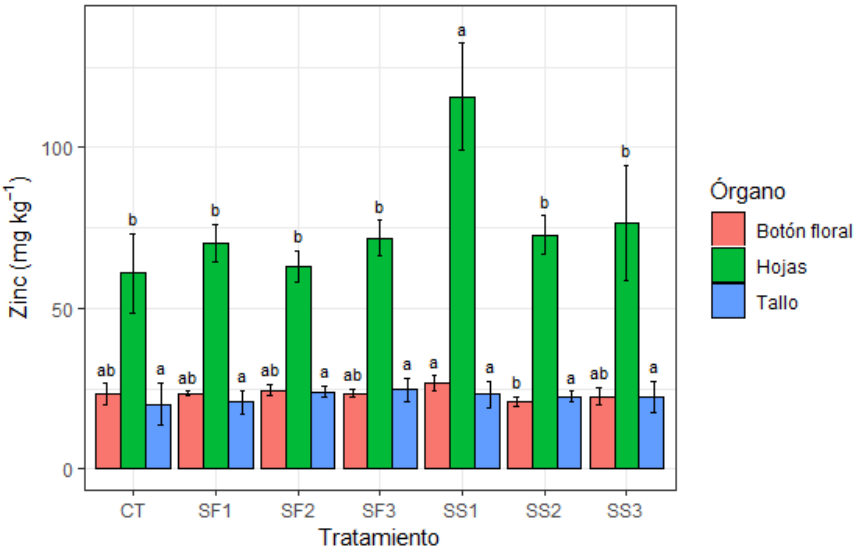

Figura 14. Concentración de zinc (Zn) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

La concentración de boro no presentó diferencias estadísticas para los tratamientos en hojas y tallos, alcanzando un promedio general de 91,34 ± 14,1 y 17,78 ± 2,01 mg kg^{-1}, respectivamente (Figura 15). En el botón floral de la rosa la aplicación de Si vía foliar, independientemente del fertilizante, se reflejó en un leve aumento en la concentración de B con respecto al control (SF1, SF2 y SF3). Por el contrario, la aplicación de Si al suelo no mostró diferencias con relación al control (12,22 ± 0,43), a excepción del fertilizante 2 (11,03 ± 1,27 mg kg^{-1}), el cual disminuyó en un 9,74% la concentración de B en el botón floral. Por lo tanto, la aplicación de Si vía foliar en el cultivo de rosa 'Brighton' podría aumentar la translocación de B de la hoja al botón floral.

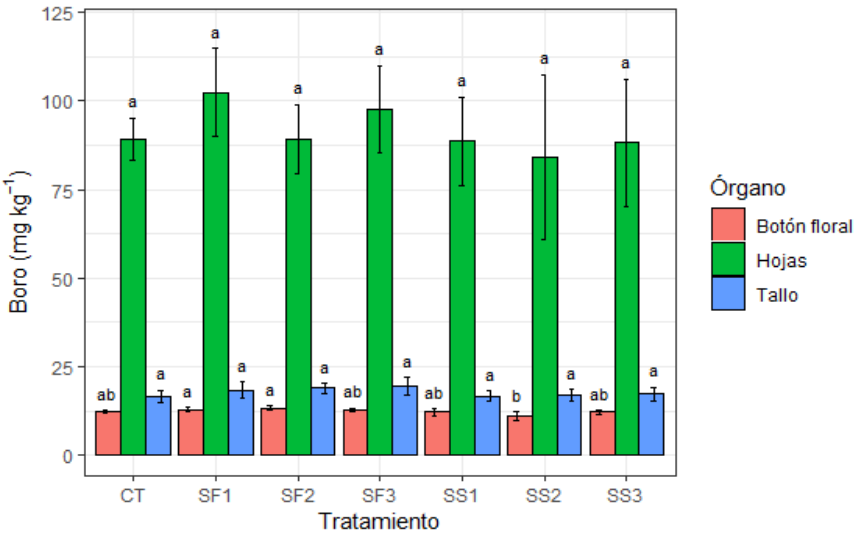

Figura 15. Concentración de boro (B) en tallo, hoja y botón floral de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio (Si). Los datos están expresados como porcentaje (%) de masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

2.4.3 Elementos benéficos

La concentración de sodio en el botón floral no presentó diferencias estadísticas entre los tratamientos, alcanzado un valor promedio general de 141,3 ± 44,17 mg kg^{-1}. La aplicación de Si al suelo de los fertilizantes 1 y 2 disminuyó la concentración de Na en hojas en un 27,75% y 28,15%, respectivamente. Por otro lado, la concentración de Na en tallo tuvo un leve aumento con el tratamiento SF1 con respecto al control, caso contrario ocurrió con el tratamiento SS3, el cual disminuyó el Na con relación al control.

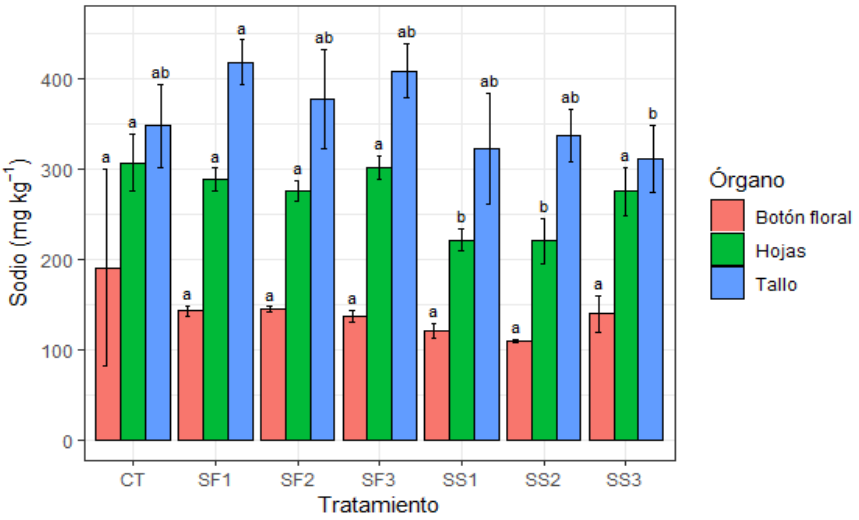

Figura 16. Concentración de sodio en tallo, hoja y botón floral de plantas de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de silicio). Los datos están expresados como porcentaje de la

masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

La concentración de silicio en el tejido foliar no presentó cambios estadísticos entre los tratamientos según el análisis de varianza (Figura 13), alcanzando un valor promedio total de 0,59% ± 0,103.

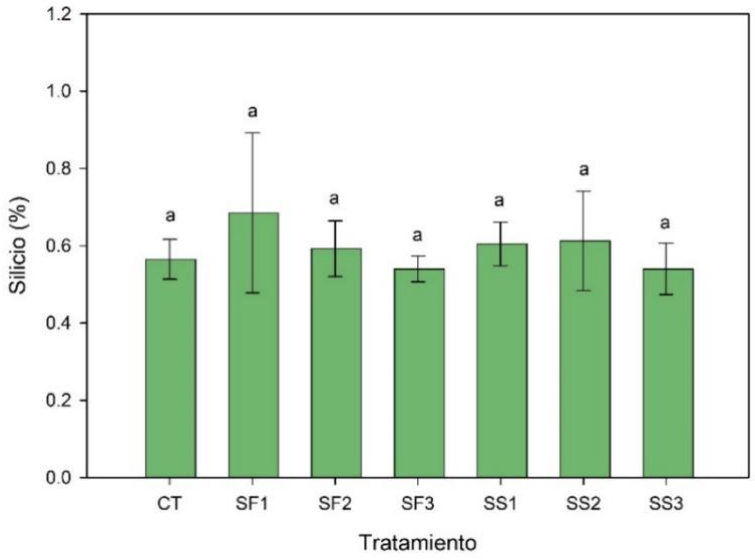

Figura 17. Concentración de silicio foliar en plantas de rosa cv. 'Brighton' sometidas a diferentes aplicaciones de Si. Los datos están expresados como porcentaje de la masa seca. Las barras representan la desviación estándar (n = 4). Letras minúsculas diferentes entre barras representan diferencias estadísticas entre los tratamientos según la prueba Tukey.

2.5 Discusión

El efecto del Si sobre la nutrición mineral de las plantas, tanto elementos esenciales como benéficos, depende de las concentraciones de Si, la especie en cuestión y los métodos de adquisición del Si por la planta, por ello la necesidad de estudiar y caracterizar la sinergia del Si con la nutrición de las plantas (Pavlovic *et al*., 2021). En esta investigación, se presenta la influencia de diferentes métodos de aplicación y fertilizantes de Si sobre la concentración y translocación de los nutrientes minerales en plantas de rosa cv. Brighton. Cómo se puede evidenciar en el apartado de los resultados, el Si parece tener una relación específica sobre cada elemento mineral evaluado, por lo que no se puede concluir de manera general para todos los nutrientes (Figura 5-17).

2.5.1 Efecto de la aplicación de Si sobre la concentración de macronutrientes

La concentración de N no se vio afectada por la aplicación de Si en hojas, tallo y botón floral (Figura 1). En la mayoría de los estudios donde se evalúan aplicaciones exógenas de Si, se presenta una relación antagónica con el N, disminuyendo su absorción y acumulación en los tejidos como el caso de arroz, arveja, trigo y lechuga (Wu *et al*. 2017, Greger *et al*., 2018), o sin tener un efecto en la concentración de N como en rosa, papa y maíz (Pilon *et al*., 2013; da Silva *et al*., 2023; Guio-Rodríguez *et al*., 2022). Para explicar este efecto, Wu *et al*. (2017), encontraron que aplicaciones Si en arroz disminuyeron la expresión del gen transportar de amonio (*OsAMT1;1*) y el gen glutamina sintetasa (*OsGS1;1*), lo que redujo la absorción de N. Por lo tanto, la variabilidad de los resultados entre la interacción de Si y N pudiera estar ligada netamente a la sensibilidad de la especie al Si (como el arroz), y en rosa parece ser que no existe relación Si – N, tal como se obtuvo en rosa var. 'Snowflake' (Guio-Rodríguez *et al.,* 2022)

El P no tuvo un efecto a la aplicación de Si en hojas y tallos, sin embargo, si aumentó la concentración en botón floral cuando se aplicó el fertilizante 1 vía foliar, pero se redujo con la aplicación al suelo con el fertilizante 2 (Figura 2). Estos resultados difieren con lo reportado por da Silva *et al*. (2023), quienes encontraron que la aplicación al suelo y foliar de silicato de potasio aumentaba la concentración de P en las hojas, asimismo ocurrió en hojas de papa (Pilon *et al.,* 2013). Ante esto, Kostic *et al*. (2017) plantea dos explicaciones en los que el Si puede interferir en la absorción de P en trigo: la primera es la disminución del pH en la solución del suelo, lo cual restaura la disponibilidad del P para que sea adquirido por la raíz; la segunda es el aumento en la exudación de ácidos orgánicos (carboxilatos), lo que aumenta la expresión de transportadores de P inorgánico *PHT1;1* y *PHT1;2*.

El contenido de K en plantas no se vio afectado por la aplicación de Si (Figura 3). Bajo condiciones no estresantes, se han visto resultados contrastantes en la interacción de Si – K. Varios estudios han reportado que el Si no ha tenido efecto sobre la concentración de K (Pilon *et al.,* 2013; Jang *et al*., 2018; Guio-Rodríguez *et al*., 2022). Sin embargo, da Soliman *et al.* (2021) reportó un aumentó en la concentración foliar de K en durazno por aspersión de silicato de potasio (K_2SiO_3). Existe poca evidencia que muestre un mecanismo de la influencia de Si sobre K en condiciones no estresadas. Bajo condiciones de salinidad y deficiencia por K, la aplicación de Si foliar o al suelo ha demostrado aumentar la expresión de transportadores de K en arroz (*OsHAK5, OsAKT1, OsSKOR*) y aliviar el estrés (Yan *et al*., 2021; Sarah *et al*., 2022). Por lo tanto, es probable que la fuente de silicio empleada en el estudio de Soliman *et al*. (2021) haya tenido efecto sobre la concentración de K, sin embargo, en nuestra investigación se empleó la misma fuente en los tres fertilizantes evaluados (Tabla 1), por lo que este factor no influyó en el K de la planta.

El Ca y Mg no mostraron diferencias en las aplicaciones de Si con respecto al control en todos los órganos de la planta de rosa (Figura 4 y 5), a excepción de la concentración de Mg en el botón floral, el cual disminuyó al aplicar Si del fertilizante 2 al suelo. Con respecto al Ca, existen estudios donde la aplicación de Si disminuyó (Jang *et al*., 2018), no tuvo

efecto (da Silva *et al*., 2023), y aumentó (Greger *et al*., 2018; Guio-Rodríguez *et al*., 2022) la concentración de Ca en la hoja. Esta variabilidad puede ser atribuida a la función similar que poseen el Si y el Ca, ya que ambos pueden establecer interacciones complejas con carbohidratos estructurales de la pared celular, tales como la pectina y ligninas de las células epidermales de las hojas (Ma *et al*., 2023), por lo que dependerá de la sensibilidad de la especies al Si y la dosis de aplicación. Con relación al Mg, estudios han mostrado el aumento de este catión con la aplicación de Si (Greger *et al*., 2018; Guio-Rodríguez *et al*., 2022; da Silva *et al*., 2023), sin embargo, debido a la escasa bibliografía disponible sobre los mecanismos de interacción del Si con el Mg, el efecto del Si parece depender de la especie vegetal y de las circunstancias ambientales (Pavlovic *et al*., 2021).

La concentración de S solamente se vio disminuida con la aplicación del fertilizante 2 de Si al suelo en el botón floral, pero no en hoja y tallo. Resultados similares se han obtenido en colza, donde aplicaciones de Si no aumentaron la concentración de S en la parte área, ni tampoco la expresión en los transportadores de S (*BnaSultr1.1* y *BnaSultr1.2*), sin embargo, se obtuvo el efecto contrario en la plantas a las que se les aplicó Si pero no S (Laîné *et al*., 2022). Esto debido a que el Si aumenta la acumulación y uso eficiente de S cuando se presenta una deficiencia de S (Barreto *et al*., 2022). En nuestra investigación, al presentarse una dosis óptima de S, no se vio interacción entre estos dos elementos.

2.5.2 Efecto de la aplicación del Si sobre la concentración de micronutrientes

El Fe mostró reducciones en la concentración de la hoja cuando se aplicó Si, especialmente de manera edáfica con el fertilizante 1 y 2 (Figura 7), lo que redujo la translocación hacia el botón floral. En condiciones óptimas de Fe, el Si puede tener una interacción positiva (Greger *et al*., 2018) o no mostrar efecto (Pilon *et al*., 2013) en la acumulación de Fe. Sin embargo, cuando el Fe se presenta en condiciones elevadas del óptimo, como ocurrió en esta investigación con las plantas control (Tabla 5), el Si puede ocasionar una obstrucción apoplástica en la raíz según la hipótesis planteada por Coskun *et al*. (2019), ya que los óxidos de Si (SiO_2) pueden depositarse en la banda de Caspary y contribuir en la suberización de esta, reduciendo el paso apoplástico. Recientemente, se ha comprobado esta hipótesis en arroz, donde la formación de la banda de Caspary inducida por Si dificultó el flujo de Fe hacia el apoplasto de la corteza y, por lo tanto, la absorción de Fe (Becker *et al*., 2020). Otra explicación de este resultado es la formación de silicatos de hierro (Fe_2SiO_4) en la rizosfera o células de la raíz los cuales se depositan en las paredes celulares del apoplasto, gracias a que los óxidos de hierro pueden combinarse con el silicato precipitado con carga negativa (Carrasco-Gil *et al*., 2018). Por ende, es probable que la deposición de Si en las vías apoplástica de la raíz hayan disminuido la concentración de Fe en las plantas de rosa cuando se aplicó Si al suelo, debido a que este se encontraba en alta concentración, y por ende, limitaban la translocación de Fe hacia las hojas y botones florales.

La concentración de Mn foliar aumentó con la aplicación de Si (Figura 8), especialmente con los fertilizantes 1 y 2 de Si aplicados al suelo. En rosa y otras especies comerciales, la concentración foliar de Mn también incrementó con la aplicación foliar o al suelo de Si (Greger *et al*., 2018; Guio-Rodríguez *et al*., 2022). Para explicar este fenómeno, Wiese *et al*. (2007) plantean que el Si puede formar enlaces con el Mn en el apoplasto y simplasto de la hoja, lo que le ayuda a la planta a tolerar altas concentración de Mn y por ende, aumentar la acumulación de este micronutriente en las hojas. Por lo tanto, la aplicación de Si foliar y al suelo ayudaría a fijar el Mn en las hojas de rosa y aumentar su concentración.

La aplicación de Si tendió a aumentar ligeramente la concentración de Cu en las hojas cuando se aplicó el fertilizante 1 de manera foliar, sin embargo, esta concentración se redujo con el tratamiento del fertilizantes 2 aplicado al suelo (Figura 9). Estos resultados concuerdan con los reportados por Greger *et al*. (2018), quienes reportaron la reducción de la concentración de Cu en la parte aérea con aplicaciones de Si en 7 especies de importancia comercial. Este efecto puede atribuirse a dos mecanismos directamente mediados por el Si: (a) el aumento de los depósitos de Si formados en las paredes celulares, lo que incrementa los sitios de unión de Cu en el apoplasto de la raíz e impide la translocación de Cu hacía las hojas (Li *et al*., 2008; Keller *et al*., 2015); (b) niveles altos en la expresión de metalotioneínas (*AtMT2a* y *AtMT2b*), y formación de ligandos de sulfuro (Cu_2S y Cu(I)-cisteína) en las hojas, secuestrando lo iones de Cu (Khandekar y Leisner, 2011; Collin *et al*., 2014; Nikolić *et al*., 2023). Estos dos mecanismos ocasionan una reducción en la expresión de los transportadores de Cu (*AtCOPT1* y *AtHMA5*) en la raíz (Li *et al*., 2008). Por lo tanto, la aplicación de Si al suelo del fertilizante 2 pudo afectar la translocación de Cu de la raíz al tallo y hoja de las rosa cv. 'Brigthon'.

La concentración de Zn en hojas estuvo por encima del rango recomendado en el cultivo de rosas (Tabla 5), especialmente en el tratamiento SS1 el cual aumentó el Zn en las hojas, lo que incrementó la translación hacia el botón floral de la rosa con respecto al control (Figura 10). Diversos estudios han reportado resultados contrastantes en la interacción Si – Zn, donde la aplicación de Si no afecta (da Silva *et al*., 2023), incrementa (Soleiman *et al*., 2021; Guio-Rodríguez *et al*., 2022), o disminuye (Greger *et al*., 2018) la concentración de Zn en hojas bajo condiciones no estresante. Según Pavlovic *et al*. (2021), los efectos directos del Si sobre los transportadores de Zn y mantener una concentración óptima de Zn en las plantas aún no se han verificado, y parece depender de la sensibilidad de la especie a los dos elementos. En cáñamo (especie acumuladora de Zn), la aplicación de Si disminuyó la absorción de Zn en la raíz pero no redujo la translocación hacia las hojas, por lo que la concentración de las hojas no se vio afectada (Luyckx *et al*., 2023). Efecto contrario se evidencio en 7 especies comerciales, donde la concentración de Zn aumentó en las raíces, y disminuyó en la parte aéreas de las plantas (Greger *et al*., 2018). Por lo tanto, es posible que el Si aumente la acumulación de Zn en el apoplasto de la raíz gracias al aumento en los sitios de unión de la pared celular (mecanismos de cationes de los otros microelementos), pero la translocación parece depender de la sensibilidad de la especie al Si y al Zn. En rosa var. 'Brigthon' la translocación aumentó solamente con la aplicación al suelo del fertilizante 2 de Si, como se observó también en rosa var. 'Snowflake' (Guio-Rodríguez *et al*., 2022).

En cuanto al B, el Si afectó la translocación hacia el botón floral, disminuyendo ligeramente cuando se aplicó al suelo con el fertilizante 2 (Figura 11). A pesar de que no se evidencio un efecto significativo en la concentración de B, existe una estrecha analogía entre Si y B. Ambos elementos son absorbidos por las plantas en forma de moléculas no disociadas (H_4SiO_4 y H_3BO_3) y, tanto el Si como el B, forman complejos con componentes de la pared celular, el Si en forma de polímeros amorfos hidratados ($SiO_2 \bullet nH_2O$) y el B en forma de complejos B-pectina (Sheng *et al*., 2024). Por lo tanto, puede existir competencia a nivel de la funcionalidad fisiológica en el apoplasto de raíces y hojas entre el Si y B, el cual compiten por sitios de unión y formación de compuestos con la pared celular. En este estudio, como se ha evidenciado en otras investigaciones realizadas (Pilon *et al*., 2013; da Silva *et al*., 2023), no se vio un efecto en la concentración de B en las hojas, por lo que la relación antagónica que posiblemente existe entre Si y B no ocurrió en este experimento.

2.5.3 Efecto de la aplicación de Si sobre la concentración de elementos benéficos

La interacción entre el Si y Na^+ en la nutrición mineral de plantas se ha estudiado principalmente bajo condiciones de estrés por salinidad. Según Javaid *et al*. (2019), la aplicación de Si al suelo inmovilizó los iones de Na^+ en la raíz e impidió la translocación hacia los brotes de trigo, debido a que el que el Si se encontraba en abundancia en la pared celular de las células epidérmicas de la raíz y ocasionaba una barrera física para el Na^+. En la presente investigación, se encontró resultados similares, donde la aplicación de Si al suelo con el fertilizantes 1 y 2 redujeron la concentración de Na^+ en hojas. Aunque no se ha reportado un mecanismo directo del Si en la absorción del Na^+, es probable que el Si contribuye a la inmovilización física indirectamente del Na por su interacción con la banda de Caspary como se discutió anteriormente por Coskun *et al*. (2019), ya que puede crear una barrera física que limita la entrada de Na hacia el xilema, pero sin formar silicatos de sodio (Javaid *et al*., 2019). Por lo tanto, aunque no se presentaba un estrés por salinidad mediado por NaCl en las plantas de rosa evaluadas, es posible que aplicaciones de Si al suelo disminuyeron la absorción y translocación de Na hacia las hojas.

La concentra de Si en hoja no se vio afectada por la aplicación exógena de este mismo elemento en las plantas de rosa var. ‘Brighton’. Estos resultados son contrastantes con los reportados por Guio-Rodríguez *et al*. (2022), quienes encontraron que aplicaciones foliares y edáficas de Si aumentaron la concentración de Si en hojas de rosa var. ‘Snowflake’. Ante esto, es probable que las dosis de Si en los diferentes fertilizantes utilizados no hayan sido suficiente para aumentar la concentración en la hoja, como reporta da Silva *et al*. (2023) con aplicaciones foliares de Si en maíz. Además, cuando se aplica al suelo, gran parte del Si puede ser acumulado en las células epidermales de la raíz (Pavlovic *et al*., 2021), por lo que podría limitar la translocación de Si hacia las hojas en las plantas de rosa, y aun así tener efecto en la absorción y translocación de los macro y microelementos. Por último, debido a la concentración promedio de Si que se alcanzó (0,59%), se puede clasificar a la

rosa var. ‘Brighton’ como plantas moderadamente acumuladoras de Si, ya que los valores oscilan entre 0.5 a 2% (Takahashi *et al*., 1990).

En conclusión la aplicación precosecha de silicio al suelo afectó el contenido nutricional del tallo floral de rosa cv. ‘Brighton’, en comparación con las aplicaciones foliares. Este efecto se vio en algunos elementos menores y benéficos como el Na, pero no en los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, y S). Al aplicar de forma edáfica los fertilizantes 1 y 2 de silicio (SS1 y SS2), la concentración foliar de Fe y Na disminuyó, mientras que la de Mn incrementó. Específicamente, el tratamiento SS1 aumentó concentración del Zn en la hoja, en cambio el SS2 redujo la de Cu. Por lo tanto, los fertilizantes 1 y 2 a base de silicio tienen una interacción directa con la absorción y translocación de elementos menores en las plantas de rosa cv. ‘Brighton’.

2.6 Referencias

Albornoz, C., Silva, A., & Torres, F. (2016). Fertiriego con silicio en variedades de rosa sobre la severidad de mildeo polvoso (*Sphaerotheca pannosa* var. rosae). *Rev. Cienc. Agr*. 33(2): 84 - 94. http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.55

Barreto, R. F., Maier, B. R., Prado, R. D. M., De Morais, T. C. B., & Felisberto, G. (2022). Silicon attenuates potassium and sulfur deficiency by increasing nutrient use efficiency in basil plants. *Scientia Horticulturae*, 291, 110616. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110616

Becker, M., Ngo, N. S., & Schenk, M. K. A. (2020). Silicon reduces the iron uptake in rice and induces iron homeostasis related genes. *Scientific Reports*, 10(1), 5079. https://doi.org/10.1038/s41598-020-61718-4

Cabrera, R.I., Solís-Pérez, A.R., & Sloan, J.J. (2009). Greenhouse rose yield and ion accumulation responses to salt stress as modulated by rootstock selection. *HortScience* 44(7), 2000–2008. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.7.2000

Carrasco-Gil, S., Rodríguez-Menéndez, S., Fernández, B., Pereiro, R., De la Fuente, V., & Hernandez-Apaolaza, L. (2018). Silicon induced Fe deficiency affects Fe, Mn, Cu and Zn distribution in rice (*Oryza sativa* L.) growth in calcareous conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, *125*, 153-163. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.01.033

Collin, B., Doelsch, E., Keller, C., Cazevieille, P., Tella, M., Chaurand, P., Panfili, F., Hazemann, J., & Meunier, J. (2014). Evidence of sulfur-bound reduced copper in bamboo exposed to high silicon and copper concentrations. *Environmental Pollution*, 187, 22-30. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.12.024

Coskun, D., Deshmukh, R., Sonah, H., Menzies, J. G., Reynolds, O., Ma, J. F., Kronzucker, H. J., & Bélanger, R. R.. (2019). The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*, 221(1), 67–85. https://doi.org/10.1111/nph.15343

da Silva, A.P.R., da Silva, L.J.R., Deus, A.C.F., Fernandes, D., & Büll, L. (2023). Silicon Application Methods Influence the Nutrient Uptake of Maize Plants in Tropical Soil. *Silicon* 15, 7327–7334. https://doi.org/10.1007/s12633-023-02592-3

Darras, A. I. (2020). Implementation of Sustainable Practices to Ornamental Plant Cultivation Worldwide: A Critical Review. *Agronomy*, 10(10), 1570. https://doi.org/10.3390/agronomy10101570

Farahani, H., Sajedi, N.A., Madani, H., & Reza, M. (2021). Effect of Foliar-Applied Silicon on Flower Yield and Essential Oil Composition of Damask Rose (*Rosa damascena* Miller) under Water Deficit Stress. *Silicon* 13, 4463–4472. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00762-1

Faust, J. E., & Dole, J. M. (2021). The global cut flowers and foliage marketplace. En: Faust, J., & Dole, J. (Eds.), *Cut flowers and foliages* (pp. 1 – 47). CAB International: Londres.

Franco-Hermida, J. J., Henao-Toro, M. C., Guzmán, M., & Cabrera, R. I. (2013). Determining Nutrient Diagnostic Norms for Greenhouse Roses. *Hortscience*, 48(11), 1403–1410. https://doi.org/10.21273/hortsci.48.11.1403

Gorrepati, E.A., Wongthahan, P., Raha, S., & Fogler, H.S. (2010). Silica Precipitation in Acidic Solutions: Mechanism, pH Effect, and Salt Effect. *Langmuir*, 26, 10467–10474. https://doi.org/10.1021/la904685x

Greger, M., Landberg, T., & Vaculík, M. (2018). Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. *Plants*, 7(2),41. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0894-8

Guio-Rodríguez, V. A., Álvarez-Herrera, J. G. & Gutierrez-Villamil, D. A. (2022). Estado nutricional en rosa hidropónica “Snowflake” bajo diferentes tratamientos de silicio. *Acta Agronómica*, 71(3). https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.105681

Hernández-Apaolaza, L., Escribano, L., Zamarreño, A. M., García-Mina, J. M., Cano, C. y Carrasco-Gil, S. (2020). Root silicon addition induces Fe deficiency in cucumber plants but facilitates their recovery after Fe resupply. A comparison with Si foliar sprays. *Frontiers in Plant Science,* 11, 580552. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.580552

Huché-Thélier, L., Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Canet, A., Symoneaux, R., Douillet, O., & Guérin, V. (2011). Nitrogen deficiency increases basal branching and modifies visual quality of the rose bushes. *Scientia Horticulturae*, 130(1), 325-334. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.007

ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1997). NTC 370: Abonos o fertilizantes, determinación del nitrógeno total. *Norma Técnica Colombiana* (3ra edición), Bogotá, Colombia.

ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2001). NTC 274: Abonos o fertilizantes, método de ensayo para la determinación cuantitativa del fósforo. *Norma Técnica Colombiana* (1ra edición), Bogotá, Colombia.

ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). NTC 1154: Fertilizantes y acondicionadores de suelos, determinación de azufre. *Norma Técnica Colombiana* (4ta edición), Bogotá, Colombia.

ICONTEC, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2014). NTC 1816: Abonos o fertilizantes, método de ensayo para determinar el contenido de boro, método de Azometina-H. *Norma Técnica Colombiana* (4ta edición), Bogotá, Colombia.

ITC, International Trade Centre. (consultado el 24 de agosto del 2023). Disponible en: https://www.trademap.org/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c%7c0603%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c2%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1.

Jang, S. W., Kim, Y., Khan, A. L., Na, C. I., & Lee, I. J. (2018). Exogenous short-term silicon application regulates macro-nutrients, endogenous phytohormones, and protein expression in *Oryza sativa* L. *BMC Plant Biology*, 18(1), 4. https://doi.org/10.1186/s12870-017-1216-y

Javaid, T., Farooq, M. A., Akhtar, J., Saqib, Z. A., & Anwar-ul-Haq, M. (2019). Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na+, Cl− and mineral ions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141, 291-299. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.06.010

Keller, C., Rizwan, M., Davidian, J. C., Pokrovsky, O. S., Bovet, N., Chaurand, P., & Meunier, J. D. (2015). Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 µM Cu. *Planta*, 241(4), 847–860. https://doi.org/10.1007/s00425-014-2220-1

Khandekar, S., & Leisner, S. (2011). Soluble silicon modulates expression of arabidopsis thaliana genes involved in copper stress. *J. Plant Physiol*. 168, 699–705. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.09.009

Khoshgoftarmanesh, A. H., Khademi, H., Hosseini, F., & Aghajani, R. (2008). Influence of additional micronutrient supply on growth, nutritional status and flower quality of three rose cultivars in a soilless culture. *Journal of Plant Nutrition*, 31(9), 1543-1554. https://doi.org/10.1080/01904160802244662

Kostic, L., Nikolic, N., Bosnic, D., Samardzic, J., & Nikolic, M. (2017). Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. *Plant Soil*. 419, 447–455. https://doi.org/10.1126/science.285.5433.1542

Laîné, P., Coquerel, R., Arkoun, M., Trouverie, J., & Etienne, P. (2022). Assessing the Effect of Silicon Supply on Root Sulfur Uptake in S-Fed and S-Deprived *Brassica napus* L. *Plants*, 11(12), 1606. https://doi.org/10.3390/plants11121606

Li, J., Leisner, S. M., & Frantz, J. (2008). Alleviation of copper toxicity in arabidopsis thaliana by silicon addition to hydroponic solutions. *J. Am. Soc Hortic. Sci*. 133, 670–677. https://doi.org/10.21273/JASHS.133.5.670

Luyckx, M., Hausman, J. F., Guerriero, G., & Lutts, S. (2023). Silicon reduces zinc absorption and triggers oxidative tolerance processes without impacting growth in young plants of hemp (*Cannabis sativa* L.). *Environmental Science and Pollution*

Research International, 30(1), 943–955. https://doi.org/10.1007/s11356-022-21797-4

Ma, J. F., Zhao, F., Rengel, Z., & Cakmak, I. (2023). Beneficial elements. En: Rengel, Z., Cakmak, I., & White, P. (Eds.), *Marschner's Mineral Nutrition of Plants* (pp. 387 – 418). 4ta ed. Academic Press: Londres. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00012-5

Ma, J.F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci.*, 11(8), 392–397. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007

MADR, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Gobierno Nacional celebra con los floricultores las cifras históricas de San Valentín. https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Gobierno-Nacional-celebra-con-los-floricultores-las-cifras-históricas-de-San-Valent%C3%ADn.aspx

Nikolić, D., Bosnić, D., & Samardžić, J. (2023). Silicon in action: Between iron scarcity and excess copper. *Frontiers in Plant Science*, 14. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1039053

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

Pilon, C., Soratto, R. P., & Moreno, L. A. (2013). Effects of Soil and Foliar Application of Soluble Silicon on Mineral Nutrition, Gas Exchange, and Growth of Potato Plants. *Crop Science*, 53(4), 1605-1614. https://doi.org/10.2135/cropsci2012.10.0580

Reezi, S., Babalar, M. and Kalantari, S. (2009). Silicon Alleviates Salt Stress, Decreases Malondialdehyde Content and Affects Petal Color of Salt-Stressed Cut Rose (Rosa xhybrida L.) “Hot Lady”. *African Journal of Biotechnology*, 8, 1502-1508.

Roosta, H., & Rezaei, I. (2014). Effect of Nutrient Solution pH on the Vegetative and Reproductive Growth and Physiological Characteristics of Rose Cv. ‘Grand Gala’ in Hydroponic System. *Journal of Plant Nutrition*, 37:13, 2179-2194. https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920377

Sarah, M.M.S., Prado, R.M., Teixeira, G.C.M., de Souza Júnior, J.P., de Medeiros, R.L.S., & Barreto R.F. (2022). Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. *Silicon*, 14,773–782.

Sheng, H., Lei, Y., Wei, J., Yang, Z., Peng, L., Li, W., & Liu, Y.. (2024). Analogy of silicon and boron in plant nutrition. *Frontiers in Plant Science*, 15. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1353706

Soliman, N.G., Nomier, S.A.A., Ibrahim, N.M.M. & Gad, M.M. (2021). Effect of spraying nano-chitosan and nano-silicon on physicochemical fruit quality and leaf mineral content of florida prince peach trees. *Zagazig Journal of Agricultural Research* 48(5), 1215-1226. https://doi.org/10.21608/zjar.2021.224030

Takahashi, E.; Ma, J. F. & Miyake, Y. (1990). The possibility of silicon as an essential element for higher plants. *Comments on Agricultural and Food Chemistry*, 2(2), 99-122. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19921964619

Torre, S., Fjeld, T., & Gislerød, H. (2001). Effects of air humidity and K/Ca ratio in the nutrient supply on growth and postharvest characteristics of cut roses. *Scientia Horticulturae*, 90(3-4), 291-304. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00230-8

Triana, Y.; Castiblanco, E., & Flórez, V. (2006). Comportamiento de nutrientes en un sistema de cultivo sin suelo en rosa. In: Flórez, V.; Fernández, A; Miranda, D.; Chaves, B.; and Guzmán, J. (eds). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*, pp. 249 – 264. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Wiese, H., Nikolic M., & Römheld, V. (2007). Silicon in plant nutrition. En: Sattelmacher, B. & Horst, W. J. (eds), *The apoplast of higher plants: Compartment of storage, transport and reactions* (pp. 33-47). Springer: Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5843-1_3

Wiese, H., Nikolic M. & Römheld V. (2007). Silicon in plant nutrition. In: Sattelmacher, B. y Horst, W. J. (eds). *The apoplast of higher plants: Compartment of storage, transport and reactions*, pp. 33-47. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5843-1_3

Wu, X.; Yu, Y.; Baerson, S. R.; Song, Y.; Liang, G.; Ding, C.; Niu, J.; Pan, Z. & Zeng, R. (2017). Interactions between nitrogen and silicon in rice and their effects on resistance toward the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Frontiers in Plant Science*, 8, 28. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00028

3. Conclusiones y recomendaciones

3.1 Conclusiones

En esta investigación la aplicación de Si en precosecha no generó diferencias estadísticas entre los tratamientos sobre las variables masa fresca y respiración. Sin embargo, la aplicación del elemento, especialmente al suelo y con el fertilizante 1 (SS1), disminuyó la producción de etileno y, en consecuencia, una menor pérdida de pétalos y reducción en la incidencia y severidad del moho gris en los tallos florales de rosa de corte cv. Brigthon.

Además, la aplicación de silicio al suelo afectó el contenido nutricional del tallo floral de rosa cv. 'Brighton', en comparación con las aplicaciones foliares. Aunque este efecto no se observó en los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, y S), si en algunos elementos menores y benéficos como el Na. Al aplicar de forma edáfica los fertilizantes 1 y 2 a base de silicio (SS1 y SS2), la concentración foliar de Fe y Na disminuyó, mientras que la de Mn se incrementó. Específicamente, en el tejido foliar el tratamiento SS1 aumentó la concentración de Zn, mientras que el SS2 redujo la de Cu. Por lo tanto, los fertilizantes 1 y 2 con silicio mostraron una interacción directa con la absorción y translocación de elementos menores en las plantas de rosa cv. 'Brighton'.

Con estos hallazgos se podría inferir que las fuentes de silicio como silicato de potasio impactan de forma positiva en la poscosecha de plantas de rosa cv. 'Brighton', con la aplicación al suelo como la forma más efectiva, y que no todos los fertilizantes con esta fuente tienen el mismo efecto; por lo que es importante identificar el producto más eficiente.

3.2 Recomendaciones

En la presente investigación se plantean las siguientes recomendaciones que permitan profundizar en el estudio del silicio en rosa y los beneficios que podría brindar su uso en este cultivo:

- Evaluar diferentes dosis de las fuentes estudiadas en variables de nutrición y sanidad especialmente con el fertilizante 1 el cual generó un efecto más eficiente.
- Evaluar las variables de este estudio con la combinación de aplicaciones de Si, tanto al suelo como foliar.
- Evaluar variables de medición de estructura anatómica a través del uso de microscopía electrónica para comprobar el efecto en resistencia mecánica frente a patógenos como botritis.

4. Anexos.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	LABORATORIO DE CALIDAD Y POSCOSECHA DE CIENCIAS AGRARIAS	Codigo:IR-LCP-04-22
		VERSION:02
	INFORME DE RESULTADOS	Página 12 de 259
Macroproceso: Evaluación, Medición y Control		
Proceso: Gestión de Laboratorios.		

➢ ***RESPIRACIÓN***

Las concentraciones de O2 y CO2 fueron medidas tomando una muestra de gas de 5 cm^3 a través de una septa puesta en la tapa de la cámara hermética donde se encontraba el material vegetal tratado. La muestra fue tomada y analizada con un dispositivo portátil Mocon y un cromatografo de gases acoplado a detector de llama.

Tabla 4. Seguimiento respiración

FECHA	26/07/2022			28/07/2022			30/07/2022		
MUESTRA	$\%O_2$	$\%CO_2$	C_2H_4 (ppm)	$\%O_2$	$\%CO_2$	C_2H_4 (ppm)	$\%O_2$	$\%CO_2$	C_2H_4 (ppm)
T0-1	10,4	9,2	0,2421	10,9	9,1	0,2428	9,8	10,8	0,2615
T0-2	14,7	6,4	0,233	14,9	5,1	0,2453	12,5	7,3	0,2571
T0-3	11,4	8,6	0,2649	11,7	8,3	0,2492	10,2	9,7	0,2821
T0-4	12,9	7,5	0,2053	12,3	7,7	0,2238	11,9	8,1	0,2546
TSF-1	11,5	8,9	0,1899	10,5	9,2	**0,2578**	9,6	10,1	**0,3091**
TSF-2	11,2	8,6	0,1881	10,5	9,3	0,2231	9,5	10,7	0,2784
TSF-3	10,9	8,8	0,1881	9,1	10,1	0,2298	8,7	11,2	0,2833
TSF-4	11,7	8,5	0,2215	13,4	6,6	0,2229	11,2	8,6	0,2845
T1F-1	7	11,7	0,2594	10,3	9,7	0,2295	8,3	11,7	0,293
t1f-2	7,8	11,1	0,2081	10,5	9,5	0,2454	8,7	11,2	0,2892
T1F-3	5,8	12,6	0,1942	9,8	10,2	0,2253	8,1	11,9	0,2561
T1F-4	11,3	8,5	0,1961	10,7	9,3	0,2649	10,2	11,3	0,3031
T2F-1	8,9	10,5	0,2187	11,2	8,8	0,2307	9,7	10,6	0,2504
T2F-2	16,8	4,2	0,2334	16,8	3,2	0,2579	15,8	4,5	0,2812
T2F-3	15,7	5,3	0,239	15,6	4,4	0,2923	15,2	4,6	0,3412

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS. LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA RECIBIDA.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. NIT 899.999.063-3
Carrera 30 No. 45-03, Edificio 500. Lab 118 A Piso 1º **FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS, Telefono**: (57-1) 316 5000 Ext.19105, Bogotá- Colombia Correo electrónico: labposco_fcabog@unal.edu.co

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	LABORATORIO DE CALIDAD Y POSCOSECHA DE CIENCIAS AGRARIAS	Codigo:IR-LCP-04-22
		VERSION:02
	INFORME DE RESULTADOS	Página 13 de 259
Macroproceso: Evaluación, Medición y Control		
Proceso: Gestión de Laboratorios.		

T2F-4	**17,9**	**2,9**	0,2382	**16,9**	3,1	0,2482	**16,7**	4,1	0,262
TSS-1	**11,6**	**8,4**	0,2569	**11,8**	8,2	0,2514	**11,6**	8,8	0,2646
TSS-2	**13,5**	**6,6**	0,2244	**11,5**	8,5	0,2374	**11,9**	8,9	0,2591
TSS-3	**9,1**	**10**	0,2433	**11,5**	8,5	0,2266	**9,8**	10,1	0,2612
TSS-4	**18,1**	**2,8**	0,337	**17,6**	2,4	0,2127	**17,6**	3,1	0,2212
T1S-1	**10,7**	**9**	0,2257	**11,8**	8,2	0,2164	**10,9**	9,1	0,222
T1S-2	**7,3**	**11,7**	0,2108	**12**	8	0,2138	**11,2**	9,3	0,2199
T1S-3	**13,9**	**6,1**	0,2458	**11,5**	8,5	0,2731	**10,1**	9,6	0,2921
T1S-4	**11**	**8,9**	0,2263	**12,7**	7,3	0,2392	**11,2**	8,5	0,2591
T2S-1	**11,7**	**8**	0,1803	**12,5**	7,5	0,1965	**10,5**	9,1	0,2123
T2S-2	**15,3**	**5,7**	0,233	**15**	5	0,2529	**13**	7	0,2809
T2S-3	**7,5**	**11,6**	0,197	**10,7**	9,3	0,2916	**9,1**	11,2	0,3212
T2S-4	**17,9**	**3,1**	0,2075	**9,8**	10,2	0,2526	**9,2**	11,5	0,3143

FECHA	**1/08/2022**			**3/08/2022**			**5/08/2022**		
MUESTRA	**%O_2**	**%CO_2**	**C_2H_4 (ppm)**	**%O_2**	**%CO_2**	**C_2H_4 (ppm)**	**%O_2**	**%CO_2**	**C_2H_4 (ppm)**
T0-1	**9,2**	11,2	2,0167	**15,6**	4	0,8778	**16,4**	4,1	0,3456
T0-2	**10,6**	9,2	2,0563	**14,2**	5,4	0,8942	**16,6**	3,7	0,8125
T0-3	**9,8**	10	2,1268	**15,4**	4,3	0,7512	**17**	3,4	0,3569
T0-4	**11,3**	8,5	1,5647	**15,3**	4,7	0,8098	**17,3**	3,3	0,4156
TSF-1	**10,1**	11,2	2,4546	**13**	7,3	**0,9156**	**15,9**	**4,3**	**0,4812**
TSF-2	**9**	11,2	1,1298	**13,2**	7,4	0,9264	**15,2**	5,2	0,5078

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS. LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA RECIBIDA.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. NIT 899.999.063-3
Carrera 30 No. 45-03, Edificio 500. Lab 118 A Piso 1º **FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS, Telefono**: (57-1) 316 5000 Ext.19105, Bogotá- Colombia Correo electrónico: labposco_fcabog@unal.edu.co

TSF-3	**8,2**	**11,7**	0,6196	**13,7**	**6,2**	0,9464	**15,5**	5,5	0,4735
TSF-4	**11,2**	10,1	0,7899	**14,2**	5,4	0,3266	**16,1**	4,1	0,5125
T1F-1	**8,1**	11,9	1,1184	**13,3**	7,4	0,7456	**16,3**	3,5	0,6572
t1f-2	**8,4**	11,8	1,1376	**13,4**	6,2	0,7584	**15,1**	5	0,4211
T1F-3	**7,8**	12,1	1,0263	**15,2**	4,6	0,6842	**17,1**	3,7	0,5212
T1F-4	**9,8**	11,6	1,1394	**13,8**	6,2	0,7596	**15,4**	5,2	0,3225
T2F-1	**9,5**	11	1,0398	**14,1**	5,7	0,6932	**15,5**	4,9	0,412
T2F-2	**14,9**	5	1,1136	**16,2**	3,5	0,7424	**17,7**	3	0,3563
T2F-3	**13,3**	6,4	1,3239	**16,6**	3,2	0,8826	**17,6**	3,1	0,2215
T2F-4	**13,2**	6,1	1,0698	**16,5**	3,4	0,7132	**18,7**	1,9	0,3524
TSS-1	**10,5**	9,4	1,0095	**13,7**	5,8	0,673	**15,6**	4,9	0,3832
TSS-2	**10,3**	9,3	1,0203	**15,4**	4,2	0,6802	**17,9**	2,8	0,4729
TSS-3	**9,6**	10,4	1,0713	**13,2**	6,4	0,7142	**15,6**	4,6	0,3687
TSS-4	**15,2**	5	0,9423	**17,1**	3	0,6282	**18,7**	2,8	0,4262
T1S-1	**9,7**	10	0,9162	**15,8**	4,1	0,6108	**15,8**	4,4	0,836
T1S-2	**10,2**	9,7	0,9432	**14,2**	5,7	0,6288	**15,9**	4,2	0,365
T1S-3	**9,5**	10,2	1,1763	**14,5**	5,2	0,7842	**16,8**	4,1	0,7802
T1S-4	**10,5**	9	1,0161	**13,7**	3	0,6774	**15,6**	4,6	0,265
T2S-1	**9,2**	10,7	0,9126	**14,2**	5,6	0,6084	**17,2**	3,4	0,386
T2S-2	**11,3**	9,1	0,8925	**15,4**	4,3	0,7844	**17,1**	3,4	0,4153
T2S-3	**8,7**	11,8	1,2369	**13,2**	6,4	0,8246	**14,8**	5,2	0,5621
T2S-4	**9**	11,8	1,2603	**13**	6,8	0,8402	**14**	6	0,4792

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS. LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA RECIBIDA.