



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

DISTRIBUCIÓN Y CAPACIDAD DIFERENCIAL DE ACUMULACIÓN DE SILICIO EN PLANTAS BAJO ESTRÉS SALINO

ALMA DELIA ABARCA CERVANTES

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: “**Distribución y capacidad diferencial de acumulación de silicio en plantas bajo estrés salino**” realizada por la estudiante: Alma Delia Abarca Cervantes bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLOGÍA VEGETAL

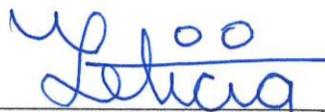
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



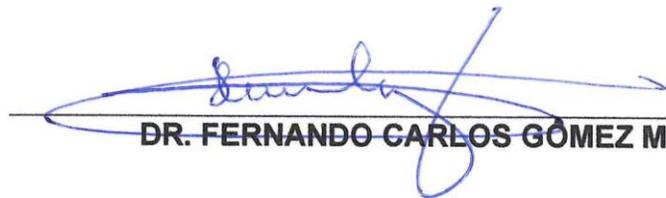
DRA. LIBIA IRIS TREJO-TÉLLEZ

ASESORA



DRA. YOLANDA LETICIA FERNÁNDEZ PAVÍA

ASESOR



DR. FERNANDO CARLOS GÓMEZ MERINO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, octubre de 2022

DISTRIBUCIÓN Y CAPACIDAD DIFERENCIAL DE ACUMULACIÓN DE SILICIO EN PLANTAS BAJO ESTRÉS SALINO

Alma Delia Abarca Cervantes, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

El silicio (Si) es un elemento benéfico que puede contrarrestar los efectos adversos en plantas que crecen en ambientes salinos. En general, las especies monocotiledóneas disponen de mecanismos más eficientes de absorción y transporte de Si en comparación con las dicotiledóneas, aunque en ambos grupos de plantas se han observado efectos bioestimulantes de este elemento. En este estudio se evaluaron los patrones de distribución y acumulación de Si en plantas de sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) y en tomate (*Solanum lycopersicum*) crecidos bajo estrés salino, y los efectos de este elemento benéfico en la tolerancia a la salinidad ocasionada por la aplicación de cloruro de sodio (NaCl) en ambas especies. Se estableció un experimento factorial 2 x 2, con Si aplicado a 0 y 2 mM, y NaCl a 0 y 100 mM. El experimento se estableció en un sistema de raíz flotante con oxigenación. En condiciones de salinidad, la aplicación de Si aumentó el volumen de raíz y la conductancia estomática en ambas especies. En raíces de tomate no afectadas por salinidad, la aplicación de Si incrementó la capacidad antioxidante total (CAT), mientras que en condiciones salinas la CAT aumentó en frutos. En sorgo no expuesto a salinidad, la aplicación de Si incrementó la concentración de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en hojas y macollos, y en la concentración de prolina del tallo principal y raíz. En condiciones salinas, la CAT aumentó en la vaina de la hoja, las concentraciones de prolina en tallo principal, y la concentración de H₂O₂ en macollos. En hojas de tomate, la aplicación de Si aumentó la concentración de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B) y Si. En sorgo, el Si estimuló las concentraciones de sodio (Na), N, K, Ca, S, Fe, B y Si. En ambas especies estudiadas en condiciones salinas, se observaron mejoras en la integridad celular de la sección transversal de la raíz con el suministro de 2 mM Si. El suministro de Si estimuló la acumulación de Si en epidermis y endodermis en ambas especies, redujo las concentraciones de Na⁺ y de Cl⁻ en tomate, y aumentó la absorción de K⁺. Se concluye que el Si mejora las respuestas de sorgo y tomate en condiciones salinas, y que la magnitud de las mejoras promovidas por el Si dependerá de la especie en estudio.

Palabras clave: Bioestimulación, bioestimulantes inorgánicos, ácido monosilícico, monocotiledóneas, dicotiledóneas, *Sorghum bicolor*, *Solanum lycopersicum*.

DISTRIBUTION AND DIFFERENTIAL CAPACITY OF SILICON ACCUMULATION IN PLANTS UNDER SALT STRESS

Alma Delia Abarca Cervantes, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

Silicon (Si) is a beneficial element that can counteract the adverse effects on plants that grow in saline environments. In general, monocot species have more efficient mechanisms for Si absorption and transport as compared to dicot species, although biostimulant effects of this element have been observed in both groups of plants. In this study, the patterns of distribution and accumulation of Si in forage sorghum (*Sorghum bicolor*) and tomato (*Solanum lycopersicum*) plants grown under salt stress were evaluated, as well as the effects of this beneficial element on tolerance to salinity caused by the application of sodium chloride (NaCl) in both species. A 2 × 2 factorial experiment was established, with Si applied at 0 and 2 mM, and NaCl at 0 and 100 mM. The experiment was established in a floating root system with oxygenation. Under salinity conditions, Si application increased root volume and stomatal conductance in both species. In tomato roots not affected by salinity, the application of Si increased the total antioxidant capacity (TAC), while under saline conditions the CAT increased in fruits. In sorghum not exposed to salinity, the application of Si increased the concentration of hydrogen peroxide (H₂O₂) in leaves and tillers, and in the proline content of the main stem and root. Under saline conditions, CAT increased in the leaf sheath, proline concentrations in main stem, and H₂O₂ concentration in tillers. In tomato leaves, Si application increased the concentration of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), zinc (Zn), manganese (Mn), boron (B) and Si. In sorghum, Si stimulated the concentrations of sodium (Na), N, K, Ca, S, Fe, B and Si. In both species studied under saline conditions, improvements in the cellular integrity of the root cross-section were observed with the supply of 2 mM Si. Si supply stimulated Si accumulation in epidermis and endodermis in both species, reduced Na⁺ and Cl⁻ concentrations in tomato, and increased K⁺ uptake. It is concluded that Si improves the responses of sorghum and tomato under saline conditions, and that the magnitude of the improvements promoted by Si will depend on the species under study.

Keywords: Biostimulation, inorganic biostimulants, monosilicic acid, monocots, dicots, *Sorghum bicolor*, *Solanum lycopersicum*.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca que me fue otorgada, para obtener el grado de maestra en ciencias.

Al programa de Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal, así como, a el área de Nutrición Vegetal de Edafología, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, por permitirme el uso de sus instalaciones.

A la Dra. Libia I. Trejo Téllez por su amistad, paciencia, inspiración, enseñanzas y, además, por su confianza en este proyecto.

Al Dr. Fernando C. Gómez Merino por su paciencia e importantes observaciones.

A la Dra Yolanda Leticia Fernández Pávia por su asesoría en esta investigación.

A la Dra, María Guadalupe Sánchez Peralta por su amistad, paciencia, confianza y apoyo brindado en esta investigación.

A la Dra. Hilda Araceli Zavaleta Mancera y al Biol. Simón Morales por las facilidades otorgadas en la Unidad de Microscopía Electrónica del Colegio de Postgraduados.

A Eloy, Lidia e Itzel por su importante apoyo en la realización de esta investigación.

A todos aquellos amigos y compañeros que colaboraron con este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres Valfre Abarca Uriostegui y Verónica Cervantes Aguilar.

A mis hermanas Cecilia y Verónica.

A mi novio Isai.

A mis eternas compañeras siempre amigas.

Porque en una eternidad siempre se puede volver a empezar...

Alma Delia

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA.....	vi
LISTA DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xiv
I.INTRODUCCIÓN	1
II.OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.3. Hipótesis general.....	3
2.4. Hipótesis específicas.....	3
III.REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1. Tomate	5
3.2. Sorgo.....	5
3.3. Silicio.....	6
3.3.1. Formas solubles de silicio en el suelo	6
3.3.2. Acceso en plantas superiores	6
3.3.3. Absorción en plantas superiores	8
3.3.4. Transporte de silicio en plantas superiores	10
3.3.5. Silicio en plantas monocotiledóneas	12
3.3.6. Silicio en plantas dicotiledóneas.....	13
3.3.7. Estrés abiótico.....	13
3.3.8. Silificación	17
3.4. Salinidad.....	21
IV.MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
4.1. Sitio de estudio.....	22
4.2. Obtención de plántulas.....	22
4.3. Trasplante	23
4.4. Solución nutritiva	24

4.5. Diseño de tratamientos y diseño experimental.....	24
4.6. Inicio y duración de tratamientos con silicio (Si) y cloruro de sodio (NaCl)	25
4.7. Manejo y condiciones del experimento	25
4.7.1. Condiciones ambientales	25
4.7.2. Renovación de soluciones nutritivas con tratamientos.....	25
4.7.3. Control de pH y monitoreo de conductividad eléctrica (CE)	26
4.7.4. Sistema de oxigenación	26
4.7.5. Reposición del agua evapotranspirada	27
4.7.6. Aplicaciones de insecticida y fungicida	27
4.7.7. Cambio del polifoam.....	27
4.7.8. Tutorio de plantas	27
4.8. Variables evaluadas	28
4.8.1. Variables de crecimiento y reproductivas	28
4.8.2. Variables fisiológicas.....	31
4.8.3. Variables bioquímicas	32
4.8.4. Concentración de nutrimentos, Si y Na	34
4.8.5. Variables anatómicas y cualitativas de raíces	37
4.9. Análisis estadístico.....	39
V.RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL	40
5.1. Condiciones climáticas.....	40
5.2. Crecimiento vegetativo y reproductivo y biomasa en relación a la CE y agua evapotranspirada de la solución nutritiva	40
5.3. Efectos en conductancia estomática y SPAD en tomate y sorgo.....	57
5.4. Efecto de Si bajo salinidad en la concentración de prolina de tomate y sorgo	58
5.5. Efecto del Si bajo salinidad en la capacidad antioxidante total de tomate y sorgo	62
5.6. Efecto del Si bajo salinidad en la concentración de H ₂ O ₂ de tomate y sorgo	70
5.7. Concentración nutrimental.....	73
5.7.1. Silicio	73
5.7.2. Sodio	77

5.7.3. Cloruro.....	82
5.7.4. Macronutrientes.....	85
5.7.5. Micronutrientes.....	104
5.8. Cambios estructurales y de distribución de Si en la raíz de tomate y sorgo bajo estrés salino	118
5.8.1. Microanálisis cualitativo de la distribución elemental en raíces.....	118
VI.CONCLUSIÓN.....	129
VII.LITERATURA CITADA	130
ANEXOS	138

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la altura de la planta y diámetro de tallo en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	42
Cuadro 2. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el área foliar de tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.....	43
Cuadro 3. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la longitud y el volumen de raíz en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	44
Cuadro 4. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la longitud de hojas verdaderas 3, 4, 5, 9 y 10, y en número de flores en tomate cv. El Cid F1.....	46
Cuadro 5. Medianas de variables no paramétricas. Longitud de raíz y hojas verdaderas 6, 7 y 8 en tomate cv. El Cid F1 y número de macollos en sorgo forrajero cv. Kikappo.....	47
Cuadro 6. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el peso de biomasa fresca en tomate cv. El Cid F1 y en sorgo forrajero cv. Kikappo.	48
Cuadro 7. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el peso de biomasa fresca en tallo y raíz de tomate cv. El Cid F1 y de sorgo forrajero cv. Kikappo.	49
Cuadro 8. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el peso de biomasa seca en tomate cv. El Cid F1 y de sorgo forrajero cv. Kikappo.	51
Cuadro 9. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el peso de biomasa seca en tallo y raíz de tomate cv. El Cid F1 y de sorgo forrajero cv. Kikappo.	52
Cuadro 10. Medianas de variables no paramétricas de biomasa en sorgo forrajero cv. Kikappo.....	53
Cuadro 11. Efecto de los tratamientos en la relación raíz/vástago de biomasa seca en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.....	56
Cuadro 12. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la relación raíz/vástago de biomasa seca en tomate cv. El Cid F1.....	57

Cuadro 13. Variables fisiológicas en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	58
Cuadro 14. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de prolina en tomate cv. El Cid.....	59
Cuadro 15. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de prolina en sorgo forrajero cv. Kikappo.	61
Cuadro 16. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la capacidad antioxidante en tomate cv. El Cid y sorgo forrajero cv. Kikappo.....	64
Cuadro 17. Capacidad antioxidante en tomate cv. El Cid.	66
Cuadro 18. Capacidad antioxidante en sorgo forrajero cv. Kikappo.	68
Cuadro 19. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de peróxido de hidrógeno en tomate cv. El Cid.....	71
Cuadro 20. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de peróxido de hidrógeno en sorgo forrajero cv. Kikappo.	72
Cuadro 21. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Si en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	74
Cuadro 22. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Na en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	78
Cuadro 23. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de cloruro en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.....	83
Cuadro 24. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de N en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	86
Cuadro 25. Medianas de variables macronutrimientales no paramétricas en tomate cv. El Cid y sorgo forrajero cv. Kikappo.....	88
Cuadro 26. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de P en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	89
Cuadro 27. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de K en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	92
Cuadro 28. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Ca en tomate cv. El Cid.....	95

Cuadro 29. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Ca en sorgo forrajero cv. Kikappo.	98
Cuadro 30. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Mg en tomate cv. El Cid.	99
Cuadro 31. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Mg en sorgo forrajero cv. Kikappo.....	100
Cuadro 32. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de S en tomate cv. El Cid.	101
Cuadro 33. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de S en sorgo forrajero cv. Kikappo.	102
Cuadro 34. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Fe en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.	108
Cuadro 35. Medianas de variables nutrimentales no paramétricas en tomate cv. El Cid.....	109
Cuadro 36. Medianas de variables nutrimentales no paramétricas en sorgo forrajero cv. Kikappo.....	109
Cuadro 37. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Cu en tomate cv. El Cid.....	110
Cuadro 38. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Cu en sorgo forrajero cv. Kikappo.	111
Cuadro 39. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Zn en tomate cv. El Cid.	112
Cuadro 40. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Zn en sorgo forrajero cv. Kikappo.	113
Cuadro 41. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Mn en tomate cv. El Cid.	114
Cuadro 42. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Mn en sorgo forrajero cv. Kikappo.....	115
Cuadro 43. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de B en tomate cv. El Cid.	116

Cuadro 44. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de B en sorgo forrajero cv. Kikappo.	117
Cuadro 45. Porcentajes relativos del elemento detectado durante el microanálisis cualitativo SEM-EDS por secciones en raíz de tomate cv. El Cid F1 y de sorgo forrajero cv. Kikappo.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo del canal de silicio (Lsi1) en plantas superiores.	9
Figura 2. Modelo del antiportador de silicio (Lsi2) en plantas superiores.....	10
Figura 3. Modelo representativo de absorción y transporte de silicio en plantas superiores.....	12
Figura 4. Efecto del estrés en la absorción de Si en plantas superiores.....	17
Figura 5. Modelo de las deposiciones de sílice en hojas en plantas superiores	20
Figura 6. Semillas de tomate var. El Cid (A) y de sorgo forrajero var. Kikappo (B) empleadas para la producción de plántulas de tomate (C) y sorgo (D) que se establecieron en un sistema de raíz flotante, dotado de un sistema de oxigenación (E, tomate; F, sorgo).	23
Figura 7. Manejo del experimento. Preparación de soluciones nutritivas (A). Adición de dosis de NaCl y Si a tinajas (B). Ajuste de pH en tinajas conteniendo soluciones nutritivas (C). Reposición de agua evapotranspirada (D).	26
Figura 8. Medición de conductancia estomática en hojas de tomate.	31
Figura 9. Curva para la determinación de prolina.	33
Figura 10. Aforo de la muestra a 10 mL para la determinación de cloruro.....	37
Figura 11. Preparación de muestras de raíz. Proceso de deshidratación de las muestras en una serie en gradiente de etanol (A). Recubrimiento de muestras con oro-paladio con la ionizadora (B). Montaje de muestras para su observación en SEM (C).	38
Figura 12. Efectos del Si y NaCl en el crecimiento del tomate var. El Cid.	54
Figura 13. Efectos del Si y NaCl en el crecimiento del sorgo var. Kikappo.....	55
Figura 14. Concentración Si por órganos en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. Las barras de error representan \pm Desviación estándar. Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM. PS: Peso seco.....	75
Figura 15. Concentración de Si en fruto de tomate (A) y en tallo principal en sorgo (B). Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM. PS: Peso seco.	76

Figura 16. Concentración Na por órganos en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. Las barras de error representan \pm Desviación estándar. -Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM.....	80
Figura 17. Gráficas de caja de la concentración de Si. Hojas de tomate (A). Tallo macollos en sorgo (B). -Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM	81
Figura 18. Concentración Cl ⁻ por órganos en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. Las barras de error representan \pm Desviación. -Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM. PS: Peso seco.....	84
Figura 19. Cortes transversales de raíz (A-D) y microanálisis por espectroscopía de rayos-X de energía dispersiva (E-S) de tomate cv. El Cid F1. Los tratamientos aplicados fueron 2 mM Si (Si), 100 mM NaCl (NaCl), 100 mM NaCl con 2 mM Si (NaCl+Si) y un testigo.....	122
Figura 20. Cortes transversales de raíz (A-D) y microanálisis por espectroscopía de rayos-X de energía dispersiva (E-S) de tomate cv. El Cid F1. Los tratamientos fueron 2 mM Si (Si), 100 mM NaCl (NaCl), 100 mM NaCl con 2 mM Si (NaCl+Si) y un testigo.....	123

I. INTRODUCCIÓN

Concentraciones excesivas de sal en el suelo son perjudiciales para el sano desarrollo de las plantas. Con el cambio climático, este problema ha aumentado y se estima que actualmente la salinidad afecta a más de 1000 millones de hectáreas de tierras agrícolas en más de 100 países alrededor del mundo (Singh, 2022).

Para contrarrestar este desafío se han implementado diferentes estrategias agronómicas como la bioestimulación, lo que permite mejorar el desempeño de los cultivos frente a ambientes estresantes (Franzoni *et al.*, 2022). Dentro de los bioestimulantes inorgánicos destaca el silicio (Si), elemento benéfico que mejora las respuestas de las plantas ante ambientes desafiantes (Coskun *et al.*, 2016; Mir *et al.*, 2022). Dentro de los mecanismos que detona el Si para mitigar los efectos del estrés abiótico se encuentran la deposición del Si en cutículas de las hojas o en pared celular, la estimulación del sistema antioxidante, la precipitación o quelatación de elementos o moléculas tóxicas, entre otros (Khan *et al.*, 2019).

Aunque el Si es el segundo elemento más abundante sobre la superficie terrestre, solo después del oxígeno, la única forma en que las plantas pueden absorberle es como ácido silícico $\text{Si}(\text{OH})_4$ (Currie & Perry, 2007). El ingreso primario de silicio ocurre en las células de la raíz mediante canales de entrada específicos (Lsi1), que pertenecen a las acuaporinas. Para el transporte de silicio en la planta se han identificado a los transportadores de eflujo (Lsi2), que transporta Si desde la exodermis al córtex y lo carga desde la endodermis al xilema, lo que modula la cantidad de silicio en el xilema, y lo mueven a las partes aéreas donde se deposita como silicio amorfo (SiO_2) (Trejo-Téllez *et al.*, 2022). A la fecha se sabe que no todas las plantas presentan dichos canales y transportadores, por lo que la absorción y traslocación de Si a partes aéreas puede ser reducida o anulada, lo que a su vez puede menguar la capacidad mitigante del Si (Gómez-Merino *et al.*, 2020; Trejo-Téllez *et al.*, 2020). Sin embargo, en especies como tomate y pimiento en las que la actividad de las proteínas Lsi1 y Lsi2 puede no ser tan eficiente, el suministro de Si ha mostrado mejoras en su desempeño al enfrentar condiciones de estrés (Hoffmann *et al.*, 2020; Trejo-Téllez *et al.*, 2020). A través de la

teoría de la obstrucción apoplástica, Coskun *et al.* (2019) han explicado que las respuestas de las plantas a la aplicación de Si se deben a las interacciones físicas y químicas que este elemento causa en el apoplasto, más que a su transporte en el interior de las células vegetales. El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de la aplicación de Si en tomate y sorgo bajo estrés salino.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo general

Evaluar los patrones de distribución y acumulación de Si en una especie acumuladora (sorgo forrajero) y una especie no acumuladora de Si (tomate) bajo estrés salino y correlacionar estos resultados con respuestas fisiológicas vegetales al estrés salino y determinar si el Si incrementa la tolerancia a la salinidad.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar respuestas fisiológicas en respuesta al estrés salino en la especie acumuladora (sorgo forrajero) y la no acumuladora de Si (tomate) en función del suministro de Si.
- Establecer si existe una relación entre los patrones de distribución y acumulación de Si con las respuestas fisiológicas conducentes a la tolerancia a salinidad tanto en la especie acumuladora (sorgo forrajero) como en la no acumuladora de Si (tomate).

2.3. Hipótesis general

La distribución y acumulación de Si es distinta entre la especie acumuladora (sorgo forrajero) y la no acumuladora de Si (tomate); sin embargo, en ambas especies, el suministro de Si detona respuestas fisiológicas encaminadas al incremento a la tolerancia al estrés salino.

2.4. Hipótesis específicas

- La distribución de silicio en el microanálisis EDS (espectroscopia de rayos-X de energía dispersiva-espectroscopia dispersiva de energía) presentará patrones discontinuos en el área del córtex en la especie no acumuladora bajo estrés salino, contrario a la especie acumuladora. Se observará la acumulación de Si en el xilema en los tratamientos sometidos a un estrés salino con diferencias en la ruta de acumulación (uniformidad y abundancia) de la especie no acumuladora. El grosor de la banda de Caspary e incidencia de suberina y lignina en células endodérmicas será

mayor con las aplicaciones de silicio, pero la uniformidad del grosor de la banda de Caspary será menor en la especie no acumuladora.

- Plantas bajo estrés salino tratadas con Si, tanto de la especie acumuladora como de la no acumuladora de Si, muestran incremento en variables asociadas con la tolerancia a la salinidad (capacidad antioxidante total, concentración de prolina y de pigmentos fotosintéticos) respecto a las no tratadas con Si.
- Existen relaciones específicas entre la distribución y acumulación de Si en plantas acumuladoras y no acumuladoras de Si relacionadas con el incremento en la tolerancia al estrés salino.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Tomate

El tomate en México es la principal hortaliza producida debido a la derrama económica que genera, con abastecimiento del mercado nacional e internacional. En el 2021, el volumen de producción fue de un millón 800 mil Mg en primavera-verano, y de un millón 100 mil Mg en otoño-invierno. México es un importante productor de tomate, con capacidad de exportación a países como: Estados Unidos (principal comprador), Canadá, Japón, Emiratos Árabes Unidos y Singapur. En los últimos años, las exportaciones han tenido un crecimiento constante, y se estima que para el año 2022 continúe creciendo. El estado líder productor es Sinaloa, que concentró para ciclo otoño-invierno 2021 el 59.7% de la producción nacional, seguido de Sonora con un aporte de 6.4%, Michoacán con 6.0% y Baja California Sur con 5.8%, en conjunto aportaron 77.9% del total nacional (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021).

3.2. Sorgo

A diferencia de lo que ocurre con el tomate, la producción nacional de sorgo no satisface las necesidades por lo que se importa, principalmente de Estados Unidos. Para el año 2022, se estima que, la disponibilidad de grano de sorgo a nivel nacional disminuirá 8.1% en relación al ciclo previo, debido a una reducción en la producción y las importaciones de 4.4% y 50.4%, respectivamente. En el 2021, para el ciclo primavera-verano, incrementó 13.9% la superficie sembrada respecto al 2019, y se cosechó el 87.7% de la superficie sembrada. Los principales estados productores en México son: Guanajuato, Sinaloa y Tamaulipas, con 60.4% del total nacional. En cuanto al ciclo otoño-invierno en 2021, en Tamaulipas, las heladas de enero y febrero generaron pérdidas del 39% de lo que se produce en el ciclo (SADER, 2021b).

En cuanto a sorgo forrajero, en el año 2020, la producción nacional alcanzó 3 millones de Mg, siendo Coahuila, Durango y Sinaloa los principales estados productores (SIAP, 2020).

3.3. Silicio

Etimológicamente la palabra silicio deriva del latín: *silix* (pedernal). Desde la era paleolítica el hombre utilizó herramientas de pedernal (dióxido de silicio, también llamado sílice) debido a su abundancia en la naturaleza (Martínez, 2011). En el universo, es el noveno elemento más abundante, y con aproximadamente un 28%, es el segundo en la corteza terrestre (Liang et al., 2015). Está presente en el suelo, atmósfera, agua y puede ser absorbido por diversos organismos. Se encuentra como principal constituyente de minerales (cristalinos y amorfos), rocas y suelos, como partículas microscópicas suspendidas en la atmósfera, y en solución, tanto del suelo como de cuerpos naturales y de la lluvia (Liang et al., 2015; Williamson et al., 2001)

3.3.1. Formas solubles de silicio en el suelo

Termodinámicamente, en solución el Si se encuentra en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) en un amplio rango de pH con valores de 1 a 9 (Takeno, 2005). Se ha reportado que las plantas absorben al Si en su forma de $\text{Si}(\text{OH})_4$ directamente del suelo o de las soluciones nutritivas. Con una solubilidad máxima del $\text{Si}(\text{OH})_4$ en solución de 2 mM, y con concentraciones en la solución del suelo entre 0.1–0.6 mM (Raven, 1983; Epstein, 1994). Los principales factores que determinan la biodisponibilidad de silicio en el suelo son el material parental que originó a dicho suelo (de la serie continua o discontinua), el historial de cambio de uso de suelo (alteraciones en el ciclo biogeoquímico de Si que afecten su movilidad), pH, textura (en suelos arcillosos hay un mayor contenido de Si disponible que en suelos arenosos), Eh (influencia en la solubilidad del Si), materia orgánica, temperatura y balance en la adsorción y desorción del suelo (relación del Si disponible) (Liang et al., 2015).

3.3.2. Acceso en plantas superiores

Clymans et al. (2011) estimó que la reserva total de Si amorfo (biogénico más minerogénico) en suelos templados disminuyó en aproximadamente 10% en los últimos 5,000 años por la acción antropogénica. Se ha descubierto que el sílice amorfo aumenta la capacidad de retención de agua de los suelos y actúa como la fuente principal de Si biodisponible. Sin embargo, las concentraciones de Si amorfo son más bajas en suelos

agrícolas que en suelos no agrícolas debido a la extracción realizada por los cultivos, aunque se ha reportado que, con prácticas como incendios provocados, aplicación de fertilizantes ricos en Si o el encalado aumenta su disponibilidad (Katz *et al.*, 2021) El Si biodisponible se acumula en gran medida en bosques (11.7 Tmol año⁻¹), estepas (13.3 Tmol año⁻¹) y tierras cultivadas (29.4 Tmol año⁻¹) de un total de 84 Tmol año⁻¹ para todos los biomas terrestres. Sin embargo, los seres humanos al afectar directamente la distribución y el tamaño de estos biomas influyen en el ciclo del Si a través de la silvicultura y la agricultura, por lo que se ha observado un agotamiento de los depósitos de Si a largo plazo durante el retroceso del ecosistema (Katz *et al.*, 2021).

De acuerdo con Klotzbücher *et al.*, (2020), la movilidad de Si aumenta cuando es desplazado de los sitios de sorción por compuestos que forman uniones más fuertes que él, como el fósforo y la materia orgánica, de tal manera que, se puede suponer que la fertilización mineral y el aporte de materia orgánica mediante el reciclaje de la paja de los cultivos, debería aumentar la movilización de Si en los suelos. También se encontró que los fertilizantes combinados de Si-P aumentan las concentraciones de Si disponible para las plantas en los suelos, lo que conduce a una mayor biomasa y contenido de fitolitos en plantas de arroz. Sin embargo, las interacciones Si-P en el sistema suelo-planta son impulsadas por complejos procesos biogeoquímicos que aún no se comprenden completamente (Katz *et al.*, 2021). También es de considerarse que, en plantas de cebada con deficiencias de Fe, los exudados radicales liberados por la planta se asociaron con la meteorización de la esmectita y el aumento de sílice amorfo, de manera que, la disminución de la esmectita podría evidenciar el esfuerzo de la planta para movilizar Si y micronutrientes distintos al Fe del suelo a través de la exudación de ligandos orgánicos. Entonces, la cebada ha demostrado ser capaz de movilizar Si de la esmectita, pero esto es dependiente del suministro de Fe, lo que demuestra la conexión entre la dinámica de Si y Fe en la rizosfera. Se menciona que, el estado nutricional de la planta regula el patrón de exudación de las raíces y, en consecuencia, impulsa los procesos de meteorización mineral en la rizosfera (Gattullo *et al.*, 2016).

Se ha reportado que en las técnicas que analizan sílice biogénico en ambientes acuáticos al extraer el Si amorfo también se extrae Si disuelto de silicatos (Sauer *et al.*, 2006). De

tal modo que las formas sólidas de Si del suelo, tanto, formas cristalinas de minerales de silicato como no cristalinas (sílice amorfo) se pueden disolver en diversas condiciones y velocidades, para convertirse en la fuente de ácidos monosilícicos y polisilícicos disueltos disponibles para las plantas. El ácido polisilícico se convierte con el tiempo en ácido monosilícico si la concentración está muy por debajo de la saturación (1 mM). Pero aumentando las concentraciones de ácido silícico en solución, se produce la polimerización del ácido monosilícico en ácido polisilícico. Entonces, el ácido silícico en la solución del suelo puede precipitar, pero también puede quedar adsorbido en minerales (secundarios). La adsorción del ácido polisilícico a las superficies minerales es mucho más rápida que la del ácido monosilícico y reversible; por lo tanto, el ácido monosilícico es más abundante en los poros del suelo que el ácido polisilícico (*Katz et al., 2021*). El Si en forma de ácido monosilícico puede acercarse a las raíces mediante mecanismos pasivos impulsados por la corriente de transpiración (el continuo suelo-planta-aire), lo cual corresponde a un acceso nutrimental por flujo de masas (*Katz et al., 2021*).

3.3.3. Absorción en plantas superiores

El mecanismo de absorción del Si, se ha relacionado con diversos factores. Uno de los más relevantes ha sido la transpiración, que no es que de manera independiente y directa afecte la cantidad de Si en la planta, ya que, por sí sola no ha podido explicar la variación en el contenido de Si entre plantas (*Coskun et al., 2019*). Existe evidencia de que dicha variación de Si se puede explicar por el transporte en raíces, es decir, que los mecanismos de absorción del Si están vinculados a las raíces (*Coskun et al., 2021*). De tal manera que, el ingreso primario de silicio ocurre en las células de la raíz mediante canales de entrada específicos (Lsi1) (**Figura 1**), que pertenecen a la superfamilia de las acuaporinas, una clase de proteínas formadoras de canales que facilitan el transporte de agua y solutos a través de membranas celulares. (*Coskun et al., 2019*). En años recientes, con la caracterización precisa de las acuaporinas del subgrupo NIP-III (Nodulina 26 Subgrupo de proteínas intrínsecas III) se ha identificado la sección específica permeable a Si. Dichas acuaporinas presentan una estructura similar a un reloj de arena compuesta por seis dominios transmembrana (TM) y dos hélices medias

TM que sobresalen de lados opuestos hacia el centro del poro, donde, las dos mitades de las hélices de TM forman una constricción que alberga dos dominios NPA (asparagina-prolina-alanina), y el poro forma otra constricción con un filtro de selectividad GSGR (glicina-serina-glicina-arginina). Los dos dominios NPA (asparagina-prolina-alanina) que están separados por 108 aminoácidos son permeables a $\text{Si}(\text{OH})_4$ (Deshmukh *et al.*, 2015).

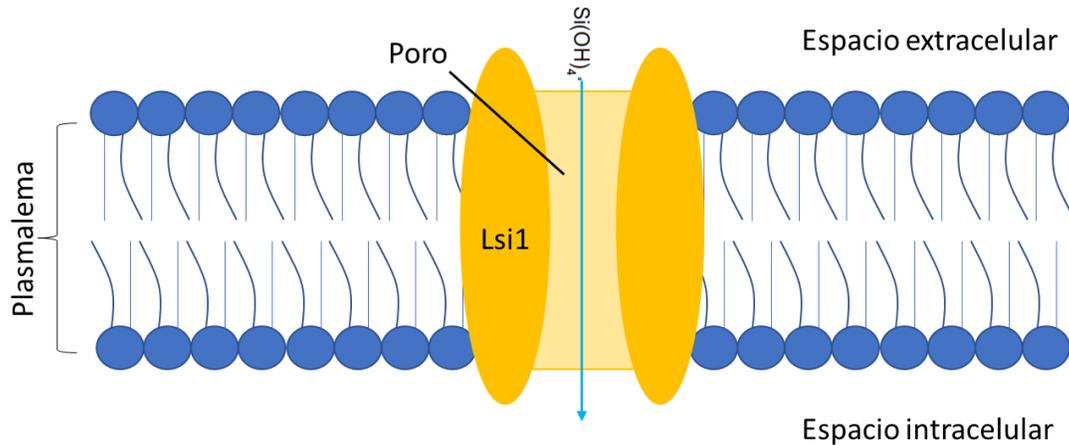


Figura 1. Modelo del canal de silicio (Lsi1) en plantas superiores.

En las últimas décadas se han hecho clasificaciones de las plantas en base a su capacidad de acumular el Si, proporcionando información sobre su distribución filogenética en el reino vegetal. Las clasificaciones se han realizado en base a: su contenido de Si en la planta (Handreck & Jones, 1967), a los conocimientos básicos de absorción del Si (Takahashi *et al.*, 1990), en relación a su capacidad de acumular Si mediante un análisis de 735 especies (Hodson *et al.*, 2005). Dichas clasificaciones se realizaron antes de que se hubieran identificados a los transportadores de Si en la planta. Es entonces que, las plantas con dichas acuaporinas podrían clasificarse como acumuladoras y no acumuladoras cuando carecen de canales NIP-III permeables de Si. Con lo anterior, se sientan las bases para entender cómo se acumula el elemento y qué plantas lo hacen (Coskun *et al.*, 2019).

3.3.4. Transporte de silicio en plantas superiores

Para el transporte de Si en la planta se han identificado a los transportadores de eflujo (Lsi2), que transporta Si desde la exodermis a la corteza y lo carga desde la endodermis al xilema modulando la cantidad de Si en el xilema, y lo mueven a las partes aéreas donde se deposita como Si amorfo (SiO_2). Sin embargo, aún no hay evidencia directa de su proceso de transporte, pero se sostiene que es una clase de transportador de aniones y funciona como un antiportador $\text{Si}(\text{OH})_4 / \text{H}^+$ (**Figura 2**) (Coskun *et al.*, 2019).

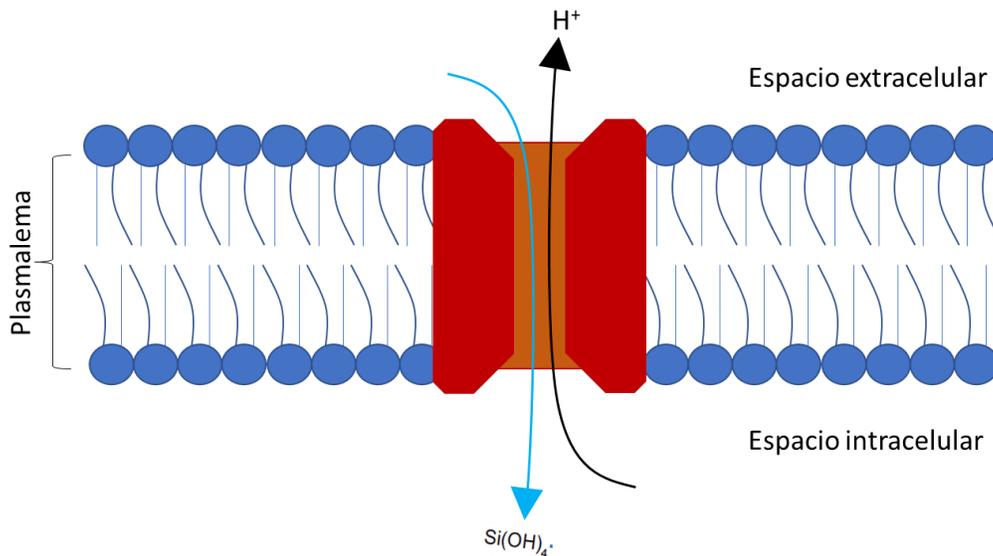


Figura 2. Modelo del antiportador de silicio (Lsi2) en plantas superiores.

Lsi2 en arroz (OsLsi2) consta de una proteína de 472 residuos que se prevé que forme 11 dominios transmembrana flanqueados por un extremo N intracelular y un extremo C extracelular. Se ha revelado que Lsi2 presenta una similitud de 99.5% con un transportador bacteriano de citrato dependiente de Na^+ . Con base en dicha similitud estructural, se ha podido especular que Lsi2 puede transportar Na^+ y / o tricarboxilatos como citrato y dicarboxilatos como succinato, malato y fumarato, siendo el citrato el ligando de mayor probabilidad para OsLsi2 (Coskun *et al.*, 2021).

Como se mencionó anteriormente, el primer paso de absorción son las células epidérmicas de la raíz o células exodérmicas en las especies vegetales, lo que requiere un transportador de influjo. Como el sistema vascular no está bien desarrollado en la

punta de la raíz, el sitio principal de absorción de Si en el arroz se encuentra en la zona de la raíz madura, donde los haces vasculares están bien formados para la posterior translocación de elementos minerales de raíces hasta el brote. Para el caso de arroz, en la región de la raíz madura, para transportar elementos minerales hacia la estela, también se requiere un transportador de eflujo (Lsi2), porque las raíces del arroz tienen dos capas de células con banda de Caspary, en la exodermis y la endodermis, y un aerénquima muy desarrollado. Por ello, se requieren dos conjuntos de sistemas transportadores de influjo-eflujo (Lsi1-Lsi2), desde la solución del suelo hasta el aerénquima a través de las células exodérmicas, y desde la solución apoplástica en el aerénquima hasta la estela a través de las células endodérmicas, para el transporte eficiente y direccional de Si (**Figura 3**). La eliminación de cualquiera de ellos da como resultado una disminución significativa de la absorción de Si de la raíz (Che *et al.*, 2018).

Estudios recientes han revelado que los transportadores de entrada y salida de elementos minerales muestran una polaridad diferente, es decir, la localización polar de los transportadores dentro de las células. De tal manera que, los canales Lsi1 de influjo se localizan en el lado distal (también llamado membrana plasmática externa o dominio periférico), mientras que los transportadores de eflujo Lsi2 se localizan en el lado proximal (también llamado membrana plasmática interna o dominio central) de las mismas células. Se cree que la localización polar de los transportadores es importante para la absorción eficiente de elementos minerales como Si, B, Fe y nitrato en las raíces (Che *et al.*, 2018).

También se han identificado otros transportadores, Lsi6, que existe en los brotes y es responsable de la descarga del xilema. En los nodos de los brotes Lsi6 y Lsi3 (que antes se pensaba que eran Lsi2 debido a similitudes estructurales) participan en la distribución de Si entre las ramas. Estos transportadores constituyen un elaborado sistema cooperativo de absorción y distribución de Si en pastos, con algunas variaciones de localización entre especies (Katz *et al.*, 2021).

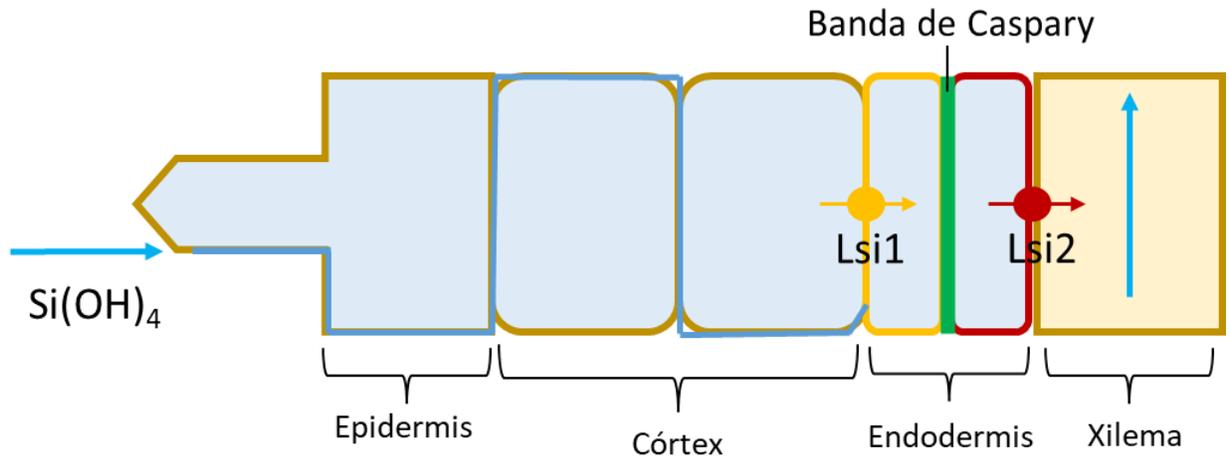


Figura 3. Modelo representativo de absorción y transporte de silicio en plantas superiores.

Cabe mencionar que, se ha propuesto que la función original de los transportadores permeables a Si era fungir como un mecanismo de desintoxicación para eliminar su exceso, por lo que Lsi2 pudo haber tenido un papel evolutivo más temprano que Lsi1. Pues, además, se ha encontrado un alto nivel de conservación en todas las embriofitas y algas verdes. Por otra parte, mediante estudios de alineación de secuencias de proteínas de seis transportadores Lsi2 se ha mostrado un alto grado de conservación entre los dominios transmembrana y un grado muy alto de variabilidad entre ellos, particularmente entre los dominios transmembrana TM6 y TM7, es decir, en el bucle intracelular más grande. Además, se observaron diferencias entre las monocotiledóneas y las dicotiledóneas como un bucle TM6-TM7 más corto y más hidrófobo para las monocotiledóneas. Sin embargo, aún no se ha determinado si estas propiedades están relacionadas con el transporte de Si y si se asocian con las propiedades de acumulación de Si relativamente más altas entre las monocotiledóneas (*Poaceae*). (Coskun *et al.*, 2021).

3.3.5. Silicio en plantas monocotiledóneas

En general se consideran a la mayoría de gramíneas, tales como: arroz, trigo, sorgo, maíz, avena, centeno y cebada como acumuladoras de silicio. En arroz se ha documentado que puede acumular hasta un 10% de peso seco de Si, siendo una

concentración mucho mayor que la de macronutrientes como nitrógeno o potasio (Liang *et al.*, 2015).

3.3.6. Silicio en plantas dicotiledóneas

En las dicotiledóneas las especies consideradas acumuladoras de Si son menores que en las monocotiledóneas, esto con relación a la presencia de las proteínas permeables a Si y a la poca información del transporte de este elemento en dichas plantas. En estas plantas, se ha observado una absorción limitante, donde la contribución relativa de Si depende de la concentración externa de Si. Sin embargo, en haba (*Vicia faba*) la absorción real fue menor a la calculada, pues la concentración de Si en la savia del xilema fue menor independientemente de la concentración en las soluciones externas (Liang *et al.*, 2015). Por ello, se ha planteado la idea de una absorción con inhibición, es decir, que la absorción de Si se puede ver reducida por inhibidores en el metabolismo (Liang *et al.*, 2006). Otro factor a considerar es la baja concentración simplástica en raíces (mucho menor que en plantas monocotiledóneas), pues, altas concentraciones simplásticas se relacionan con la facilidad de transporte de Si al xilema (Liang *et al.*, 2015).

3.3.7. Estrés abiótico

El silicio no es considerado un elemento esencial ya que no cumple con los criterios establecido por Arnon y Stout (1939), de modo que no se considera como elemento que promueva el crecimiento, la función o actividad metabólica, pero sí previene o mitiga los efectos por estrés tanto biótico como abiótico, es entonces que, se considera un elemento benéfico (Coskun *et al.*, 2019).

Se ha reportado que el Si mitiga diversos tipos de estrés abiótico tales como: radiación, salinidad, sequía, deficiencia de Fe, P y K, así como toxicidad por Cd y Na. También se ha reportado que está involucrado aparentemente en procesos como: expresión génica, homeostasis redox, estrés oxidativo, asimilación de nitrógeno, metabolismo de los carbohidratos, señalización celular, regulación hormonal, exudación radicular, quelatación de metales, arquitectura de la raíz, transpiración y fotosíntesis (Liang *et al.*, 2015; Frew *et al.*, 2018; Coskun *et al.*, 2019).

Aunque se reportado que la reducción del estrés oxidativo por efecto del Si ocurre a través de la regulación de la actividad antioxidante (enzimática y no enzimática) así como con los marcadores comunes de estrés oxidativo (malondialdehído, peróxido de hidrógeno y prolina), no hay evidencias de un efecto directo consistente (Frew *et al.*, 2018). Por lo que, se considera que el Si mitiga las tensiones provocadas por el estrés oxidativo que se refleja en una reducción de éste, es decir, no tiene un papel activo. De manera similar, los procesos reportados donde está aparentemente involucrado el Si influyen parámetros fisiológicos, la biosíntesis de citocinas, el transporte de agua, la expresión de genes de acuaporinas para aumentar la conductividad hidráulica por estrés hipoosmótico, el secuestro vacuolar de Na⁺ ante un estrés salino por un aumento en la actividad de H⁺ATPasa y mitigan la clorosis por deficiencia de K⁺. Adicionalmente, estas modificaciones en el metabolismo vegetal ocurren únicamente durante la condición de estrés, por lo que se sugiere que en lugar de estimular una función o tener un papel activo y directo, simplemente el Si mitiga la actividad que genera estrés de forma indirecta.

Entonces, al identificar efectos directos del Si en la mitigación de un estrés abiótico se han reportado aquellos relacionados con la deposición del Si en diferentes tejidos. Por ejemplo, la deposición de silicio en las cutículas previene la pérdida de agua por evapotranspiración, protegiendo a las plantas que enfrentan déficit de agua (Ma, 2004). En las raíces, se acumula alrededor de las células que expresan transportadores de silicio, como la exodermis y la endodermis en el arroz (Gong *et al.*, 2006; Ma & Yamaji, 2015), de tal modo que, la deposición de Si que rodea estas capas celulares bloquea la 'ruta de derivación apoplástica', por la cual iones como Na⁺, Cl⁻ y Cd²⁺ que ingresarían en la corriente de transpiración a través de rupturas y subdesarrollos en la banda Caspary, y posteriormente, se acumularían en brotes, potencialmente a niveles tóxicos (Coskun *et al.*, 2019). Las deposiciones de Si parecen no solo 'obstruir' las rutas de bypass apoplástico, sino también promover la formación de las bandas de Caspary al contribuir a la estimulación de la biosíntesis de suberina y lignina, principales componentes de dicha banda (Naseer *et al.*, 2012). Protegiendo así a las plantas contra el bypass apoplástico de sustancias tóxicas (Fleck *et al.*, 2015). El mecanismo por el cual ocurren estos cambios se presume es porque el silicio interactúa y retícula con fenoles

dentro de las paredes celulares o induce la precipitación de fenoles (Frew *et al.*, 2018) y dado que, los compuestos fenólicos están presentes en la suberina y principalmente en la lignina (Serra *et al.*, 2010; Maceda *et al.*, 2021), ello conduce a un desarrollo mejorado de las bandas de Caspary.

Otra forma directa de actuar del Si en la mitigación de un estrés es mediante la coprecipitación de Si y metales no esenciales como Al^{3+} en la matriz extracelular (Coskun *et al.*, 2019). Recientemente se demostró que la vía fitohormonal del etileno está implicada en la mitigación del estrés salino por el Si a través de la reducción del daño oxidativo (Liang *et al.*, 2015). Significativamente, sin etileno, el Si no solo no pudo mejorar la resistencia de la planta al estrés salino, sino que provocó un aumento en el daño oxidativo y la muerte celular (Frew *et al.*, 2018).

Factores que afectan la absorción y transporte de silicio en plantas superiores

De acuerdo con varios estudios, parece que los genes similares a Lsi que regulan la absorción de Si son comunes en muchos grupos de plantas terrestres, lo que sugiere que los orígenes de estos mecanismos son tan antiguos como la aparición de las plantas terrestres. Desde un enfoque dinámico, la respuesta de la planta a las distintas concentraciones disponibles de Si en el suelo se puede observar en algunas especies, por ejemplo, banana banana (*Musa spp*) y pepino (*Cucumis sativus*) (Henriet *et al.*, 2006; Faisal *et al.*, 2012), que parecen aumentar su absorción activa de Si cuando la disponibilidad de éste en el suelo es menor. Lo anterior sugiere una respuesta activa para satisfacer las demandas internas de Si cuando la absorción pasiva es insuficiente. En algunos casos, esto se logra aumentando la expresión de genes transportadores de Si y la densidad de dichos transportadores en condiciones de baja disponibilidad de Si, lo que indica una captación completamente activa que no solo depende de los mecanismos de captación activa sino también de las respuestas fisiológicas de estos mecanismos (Katz *et al.*, 2021).

La expresión del gen Lsi1 en arroz está regulada negativamente por el suministro de Si, el estrés por deshidratación y el ácido abscísico (más fuertemente en plantas empobrecidas de Si), lo que sugiere la regulación de la absorción activa de Si en

respuesta a cambios en la corriente de transpiración y el equilibrio hídrico interno de la planta (Katz *et al.*, 2021).

Aunque algunos autores mencionan que el mecanismo de absorción pasiva de Si es impulsado por la transpiración (Katz *et al.*, 2021). Otros autores mencionan que por sí sola la transpiración no ha podido explicar por completo la variación en el contenido de silicio entre plantas (Coskun *et al.*, 2019). Otros estudios han demostrado cómo la expresión de los genes *Lsi1*, *Lsi2* y *Lsi6* está regulada por las hormonas vegetales y las concentraciones internas de Si y metales (**Figura 4**) (Katz *et al.*, 2021).

Por otra parte, las concentraciones ambientales de CO₂ no tuvieron efecto en el contenido de Si de las raíces y los brotes en las plantas de caña de azúcar. Sin embargo, en arroz, el aumento de las concentraciones de CO₂ en el ambiente redujo la deposición de Si en la cáscara hasta en un 60%. Además, con el aumento de las concentraciones de CO₂ en el ambiente se reportaron alteraciones en la composición de los conjuntos de fitolitos en el género *Phragmites*, y una reducción del tamaño medio de los fitolitos, lo que sugiere un efecto en la asignación y distribución de Si, así como, una posible relación Si-carbono. Entre los factores de un estrés biótico, se asocia la exposición a herbívoros invertebrados y vertebrados con la inducción en la absorción y acumulación de Si en pastos (Katz *et al.*, 2021).

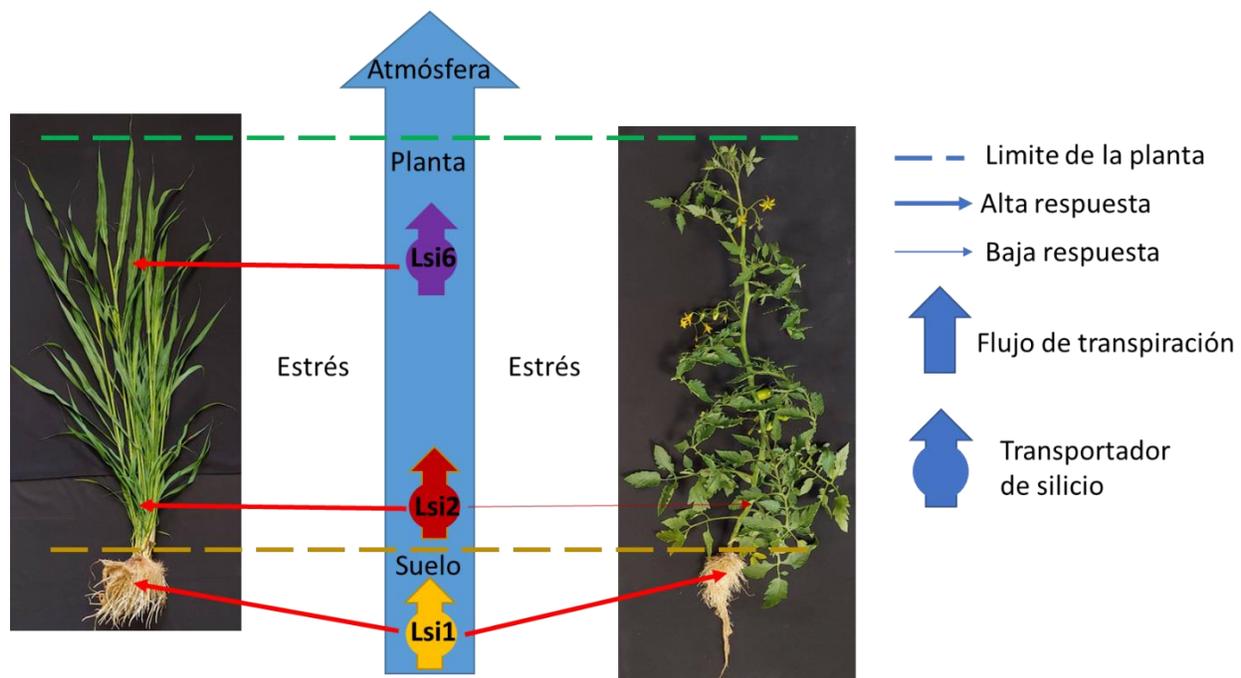


Figura 4. Efecto del estrés en la absorción de Si en plantas superiores.

3.3.8. Silificación

De igual forma, el mecanismo de deposición y acumulación de Si no está del todo claro. Se sabe que una concentración citosólica arriba de 2 mM se polimeriza en SiO_2 y puede ser tóxico para la planta (Montpetit *et al.*, 2012; Exley, 2015). Primero, el ácido monosilícico tiende a polimerizarse en ácido polisilícico, y después en sílice amorfo (Katz *et al.*, 2021). La mayoría del Si se encuentra polimerizado en el apoplasto (alrededor de las células exodérmicas y endodérmicas de la raíz y las células epidérmicas de la hoja (Gong *et al.*, 2006; Sangster *et al.*, 2001), y en los componentes de la pared celular, como hemicelulosa, se ha demostrado que la pectina y la lignina interactúan con el Si(OH)_4 como plantillas o andamios para la silificación (Guerrero *et al.*, 2016). El Si también se puede polimerizar en células especializadas y estructuras celulares de algunas especies (particularmente gramíneas), como sílice en hojas y células largas, y pelos y papilas de espiguillas (Rafi *et al.*, 1997), lo cual es evidencia preliminar para el control biológico (Kumar *et al.*, 2017; Kumar & Elbaum, 2018).

Hasta ahora, se han identificado tres tipos de deposición de sílice en las raíces: I: impregnación de las paredes celulares endodérmicas, II: agregados de sílice/fitolitos en interacción con las paredes celulares endodérmicas tangenciales internas, y III: formación de agregados/fitolitos de sílice dentro de las células específicas en la superficie externa de las fibras de esclerénquima. La relación entre la silicificación de la raíz y la lignificación aún no se ha dilucidado (Lux *et al.*, 2020).

La silicificación endodérmica asociada con la pared celular se organiza en la raíz de acuerdo con un patrón específico, se inicia en las células endodérmicas adyacentes al floema, continúa hasta los polos del xilema y, finalmente, se observa en las llamadas células de paso (Lux *et al.*, 2020). Una vez que el ácido monosilícico es absorbido por las raíces, es transportado hasta el brote a través del xilema, donde la corriente de transpiración actúa como la principal fuerza motriz. En ese sentido, los tejidos epidérmicos son más ricos en Si porque son puntos terminales de la corriente de transpiración y, por lo tanto, son sitios preferibles para la deposición de Si, aunque muchas plantas también dirigen activamente la deposición de Si a estos tejidos (Katz *et al.*, 2021). Cabe destacar nuevamente que, hay autores que no consideran un efecto directo de la transpiración en este movimiento de Si (Coskun *et al.*, 2019).

También, dentro de los tejidos vegetales, grandes cantidades de ácido monosilícico se pueden polimerizar; se ha demostrado que algunas moléculas orgánicas, como las aminas, los aminoácidos y la prolina, participan en este proceso (Katz *et al.*, 2021). En el caso de las prolinas, se ha evidenciado que durante la inducción de la resistencia sistémica inducida en pepino (*Cucumis sativus*), la síntesis de una proteína rica en prolina (PRP) fuertemente catiónica prepara las paredes celulares para una mayor deposición de sílice como refuerzo de dicha pared en el sitio de intento de penetración por hongos en células epidérmicas, de manera que, la acumulación constitutiva de PRP relacionados puede funcionar en la deposición de sílice durante ciertas etapas de desarrollo (Kauss *et al.*, 2003).

Para otros aminoácidos, se ha mostrado que en solución acuosa la serina, lisina, prolina y ácido aspártico y los correspondientes homopéptidos favorecen la condensación del ácido silícico a través de enlaces de hidrógeno e interacciones electrostáticas. Los

péptidos parecen tener un efecto más pronunciado que los aminoácidos, lo que sugiere que las interacciones electrostáticas o los enlaces de hidrógeno con una sola molécula no son suficientes para favorecer las reacciones de condensación, por lo que se trata principalmente de oligómeros de sílice cargados en lugar de ácido silícico. Esto se cree que se debe por la distribución de los grupos laterales cargados y los grupos carboxilo que forman enlaces de hidrógeno a lo largo de la cadena del péptido que están lo suficientemente cerca de las especies reactivas para que se produzca la condensación. Además de que, los péptidos exhiben un efecto catalítico más fuerte que los aminoácidos, también parecen comportarse de formas muy diferentes según la naturaleza de los grupos laterales y el pH (Coradin and Livage, 2001). Se ha mencionado que polisacáridos como la callosa (Exley, 2015), o polifenoles como la lignina (Lux *et al.*, 2020) funcionan como plantillas para la polimerización en sílice amorfo. Los autores también están de acuerdo en que la formación de sílice, está en la lignina polimerizada, pero no en los monómeros de lignina. También se ha sugerido un modelo de estabilización de H_2SiO_4 cargado negativamente por la lignina de la pared celular (Soukup *et al.*, 2017).

En cuanto a las paredes celulares de las diatomeas se ha demostrado que el $\text{Si}(\text{OH})_4$ se prepolimeriza en minutos durante la división celular dentro de pequeñas vesículas de membrana especializadas (llamadas vesículas de deposición de sílice), antes de ponerse en contacto con proteínas que inducen la formación de la red de sílice. También se ha reportado que a temperatura ambiente, pH neutro y baja concentración de Si, es poco probable que se produzca la condensación del ácido silícico, por ello se requiere el efecto catalítico de biomoléculas, entonces, se ha mencionado que los péptidos de las paredes celulares de las diatomeas y las espículas de las esponjas podrían conducir a la rápida precipitación de sílice (Coradin & Livage, 2001).

Existen diversas formas de sílice amorfo en las plantas, principalmente en la cutícula-Si de doble capa, el Si unido a la pared celular, en tricomas, traqueidas y los fitolitos que se desarrollan dentro de las células, como células epidérmicas cortas (a veces llamadas "células de sílice" o "plataformas elevadas") o en células epidérmicas largas ("esqueletos de sílice") (**Figura 5**).

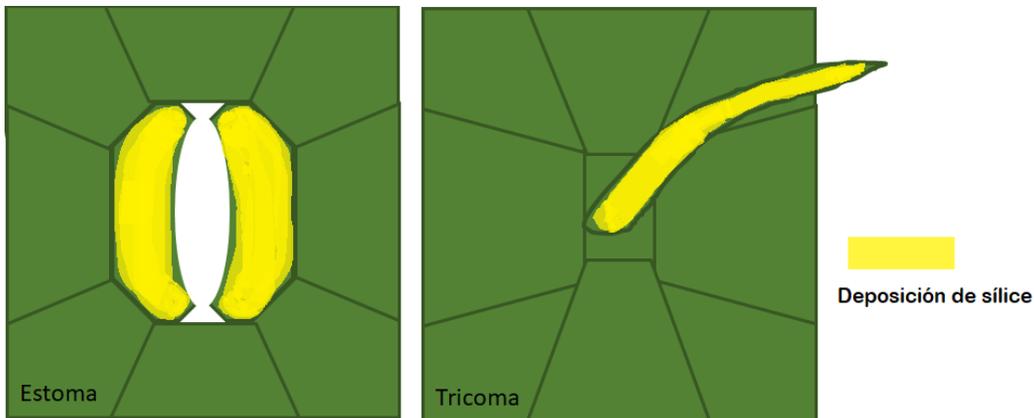


Figura 5. Modelo de las deposiciones de sílice en hojas en plantas superiores

Las variaciones en los estados de condensación del silicio sugieren diferentes procesos o tasas de formación, y probablemente funciones distintas. Por tanto, el Si depositado desempeña funciones relacionadas con su posición (Katz *et al.*, 2021).

En el proceso de silificación debe considerarse dos situaciones, cuando la deposición de Si no tiene lugar en todos los tipos de células y tejidos a los mismos tiempos y velocidades. Entonces, la silificación típica ocurre en células especializadas (epidérmicas cortas) de forma constitutiva y durante todas las fases de crecimiento y es antes de que ocurra la silificación atípica en células no especializadas adyacentes (epidérmicas largas y células estomáticas) que posiblemente depende de cantidades suficientes de agua, de Si y de la transpiración. En la segunda situación, se debe tomar en cuenta que existen algunas células (principalmente células epidérmicas) que se diferencian para convertirse en células especializadas que acumulan Si y luego experimentan más cambios anatómicos y fisiológicos (lignificación y apoptosis) para adaptarse a la deposición y llenado de Si. Con ello, se ha demostrado que la deposición de Si tiene lugar primero en la pared celular u otras partes externas de la célula, y luego ocurre el llenado con Si del lumen de la célula (Katz *et al.*, 2021).

El contenido de Si en la planta es muy variable según la especie. En general, se asocia que tejidos epidérmicos en hojas e inflorescencias son los que tienen un mayor contenido de Si y fitolitos que los tallos y raíces (Katz *et al.*, 2021). Sin embargo, en algunas especies herbáceas, como coliflor (*Brassica oleracea* L.) y grama salada (*Distichlis*

spicata), hay una mayor acumulación de Si en el tallo (Matichenkov *et al.*, 2008). Mientras que, en algunas gramíneas es mayor en inflorescencias que en hojas, por ejemplo, (*Setaria magna*) (Lanning, & Eleuterius, 1989).

3.4. Salinidad

La salinidad del suelo es el principal factor abiótico limitante en la productividad de los cultivos agrícolas especialmente en las regiones áridas y semiáridas debido a las bajas precipitaciones, altas temperaturas y alta evapotranspiración, además de las malas prácticas de manejo de suelo y agua (Munns & Tester, 2008). Se han hecho proyecciones para el 2050, donde los efectos de la salinidad afectarán al 50% de los cultivos a nivel mundial, afectando rendimientos y la producción agrícola (Velázquez *et al.*, 2020). La salinidad en especies vegetales se puede relacionar con estrés hídrico, estrés iónico y con un desequilibrio nutrimental (López *et al.*, 2020)

En México, los principales problemas de salinidad se concentran en Sonora y Tamaulipas (SADER, 2021a).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Sitio de estudio

La fase experimental se realizó en un invernadero de Nutrición Vegetal del programa de Edafología en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (19.461° N, -98.910° O).

4.2. Obtención de plántulas

Se sembraron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad El Cid F1 (lote G71260, Moran Seed Company; **Figura 6A**), y de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) de la variedad forrajera Kikappo (lote SB-1298-G04, Semillas Berentsen; **Figura 6B**) en charolas de plástico con turba de la marca Pro-Mix FLX, se colocó una semilla por cavidad y se regó con agua destilada hasta saturar el sustrato. Las charolas se mantuvieron tapadas con un plástico negro para mantener el calor y humedad por 3 d, realizando un riego por día con 250 mL de agua destilada por charola. Para el día 18 se comenzaron a regar ambas charolas con solución nutritiva de Steiner al 10% (en mol_c m⁻³: 1.2 de NO₃⁻; 0.1 de H₂PO₄⁻; 0.7 de SO₄⁻²; 0.7 de K⁺; 0.9 de Ca²⁺ y 0.4 de Mg²⁺) a pH 5.5 complementada con una mezcla comercial de micronutrientes (Tradecorp® AZ, con dosis para abastecer, en mg L⁻¹, 5 de Fe, 2.33 de Mn, 0.47 de Zn, 0.19 de Cu, 0.43 de B y 0.17 de Mo). Con dicha solución se regó hasta el día del trasplante. A los 30 días después de la siembra se hizo una aplicación foliar del fungicida Ridomil Gold® Bravo SC al 0.5% (Syngenta, i. a. mefenoxam y clorotalonil).



Figura 6. Semillas de tomate var. El Cid (A) y de sorgo forrajero var. Kikappo (B) empleadas para la producción de plántulas de tomate (C) y sorgo (D) que se establecieron en un sistema de raíz flotante, dotado de un sistema de oxigenación (E, tomate; F, sorgo).

4.3. Trasplante

El trasplante se realizó a los 33 d después de la siembra para ambos cultivos (**Figuras 1C y 1D**) en un sistema de raíz flotante, en tinas con tapa de 12 L de capacidad, recubiertas con pintura vinílica negra (Comex, Ciudad de México, México). Se colocaron tres plantas por tina soportadas de la base del tallo con polifoam en orificios hechos sobre la tapa. Un total de 10 tinas por cultivo que se colocaron en la parte media del invernadero, a lo largo de una mesa en dos filas (**Figuras 1E y 1F**). Se instaló una bomba

de aire (ECOPET[®] Mod-2688, Ciudad de México, México) por cada dos tinas como sistema de oxigenación para las raíces, programado 15 min cada 2 h de forma permanente. Cada tina se llenó a 11 L con la solución nutritiva. No se aplicaron tratamientos en ningún cultivo al momento del trasplante.

4.4. Solución nutritiva

Al trasplantar se utilizó solución de Steiner al 50%, realizando ajuste del pH en cada tina a un valor de 5.5 empleando H₂SO₄ concentrado. A los nueve días del trasplante se incrementó la concentración de la solución en sorgo de 50 a 75%, esto sin cambiar la solución, pero sí agregando la diferencia en fertilizante. A los 14 días del trasplante se cambió por completo la solución en ambos cultivos, para tomate se mantuvo al 50% y para sorgo se incrementó al 80%; el pH de las soluciones nutritivas se ajustó a 5.5 de forma permanente. Posteriormente, las siguientes renovaciones de la solución fueron al 100% cada 14 d y hasta la cosecha para ambos cultivos, teniendo un desfase de un día al realizar el cambio. Para el caso de sorgo, a los 23 d después del trasplante se inició el suministro a cada tina de quelatos de hierro (5 mg Fe-EDTA L⁻¹, adicionales a los 5 mg Fe L⁻¹ suministrado con el producto comercial Tradecorp[®] AZ antes referido). A los 29 d después del trasplante, se aumentó la dosis de Fe-EDTA a 10 mg Fe L⁻¹ dando un total de 15 mg Fe L⁻¹. Estos incrementos en la dosis de Fe obedecieron a la aparición de deficiencias visuales que indican la alta demanda de este elemento por parte del sorgo.

4.5. Diseño de tratamientos y diseño experimental

Se realizaron dos experimentos independientes, uno por cada genotipo vegetal. En ambos se condujeron experimentos factoriales 2 × 2 con una distribución completamente al azar, donde los factores de estudio fueron el silicio (Si) y el cloruro de sodio (NaCl). Las dosis de Si empleadas fueron 0 y 2 mM empleando como fuente metasilicato de sodio (Na₂O₃Si; Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA). Las concentraciones de NaCl fueron 0 y 100 mM (NaCl; J. T. Baker, Avantor, Inc, Radnor, Pennsylvania). La combinación de niveles de cada uno de los factores de estudio, dio como resultado cuatro tratamientos con seis repeticiones, la unidad experimental consistió en una plántula establecida en el sistema de raíz flotante.

4.6. Inicio y duración de tratamientos con silicio (Si) y cloruro de sodio (NaCl)

A los 7 d después del trasplante se inició la aplicación de las dosis de Si. A los 14 5 d después del trasplante se inició la adición de NaCl a la solución nutritiva. Cada 14 d, con la renovación de la solución nutritiva se adicionaban las dosis correspondientes de Si y NaCl. La duración de los tratamientos con Si y NaCl fue de 38 y 46 d para ambos cultivos, respectivamente.

4.7. Manejo y condiciones del experimento

4.7.1. Condiciones ambientales

Con un Data Logger (Hobo® Onset, H08-004-02, EE. UU.) al inicio de las aplicaciones de Si, 7 d después del trasplante, se midió la temperatura, humedad relativa e intensidad luminosa al interior del invernadero cada 30 min las 24 h del día. Datos a partir de los cuales se calculó el potencial hídrico de la atmósfera con la siguiente fórmula (García, 2014):

$$\psi_A = \frac{R T \ln \frac{e}{e^\circ}}{\bar{V}}$$

ψ_A = Potencial hídrico

R = Constante general de los gases ($8.314 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ MPa mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$)

T = Temperatura absoluta ($^\circ\text{K}$)

$\frac{e}{e^\circ}$ = Humedad relativa absoluta

\bar{V} = Volumen parcial molal del agua ($1.805 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$)

4.7.2. Renovación de soluciones nutritivas con tratamientos

Cada 14 d se realizó la renovación de las soluciones nutritivas (**Figura 7A**), que incluía la adición de las concentraciones correspondientes de NaCl y Si, en todos los casos el pH se ajustó a 5.5 (**Figura 7B**).

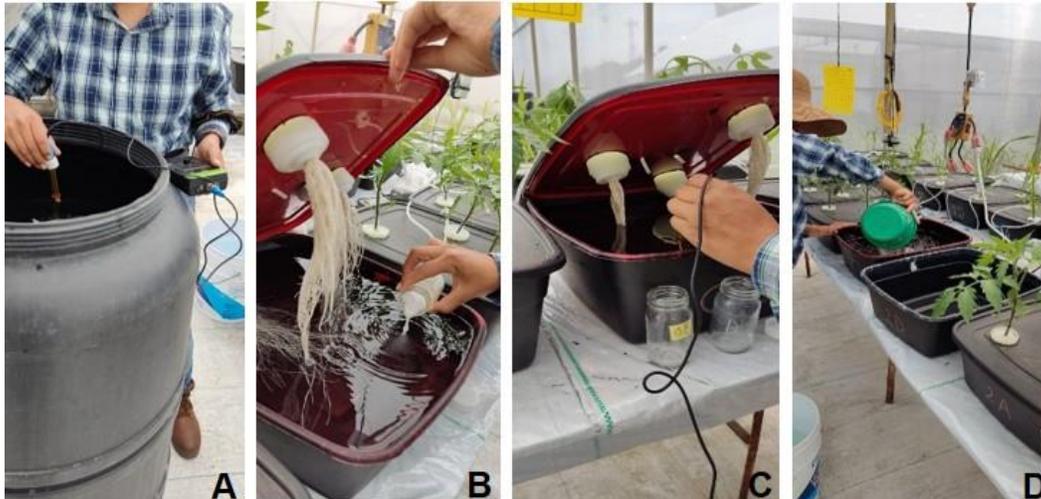


Figura 7. Manejo del experimento. Preparación de soluciones nutritivas (A). Adición de dosis de NaCl y Si a tinas (B). Ajuste de pH en tinas conteniendo soluciones nutritivas (C). Reposición de agua evapotranspirada (D).

4.7.3. Control de pH y monitoreo de conductividad eléctrica (CE)

Al momento de la renovación de soluciones nutritivas y posteriormente cada 24 h, se realizó ajuste del pH a 5.5. con H_2SO_4 concentrado usando un potenciómetro (CONDUCTRONIC, PC18, Ciudad de México, México) como se observa en la **Figura 7C**.

La evaluación de la conductividad eléctrica (CE) se realizó tras cada renovación de solución nutritiva y aplicación de tratamientos. Para lo anterior, se tomaron 3 alícuotas por cada tratamiento con salinidad y 2 alícuotas por tratamiento no salino de 50 mL, mismas que fueron llevadas al laboratorio para la medición, empleando un conductímetro de mesa (Hanna® instruments, HI5522-01, Padua, Véneto, Italia).

4.7.4. Sistema de oxigenación

Desde el trasplante de las plantas de tomate y sorgo al sistema de raíz flotante, se acondicionó un sistema de oxigenación, consistente en bombas de pecera (descritas en el apartado 5.3) programadas con un temporizador (Steren, TEMP-08E, Ciudad de México, México), para proporcionar oxígeno durante 15 min cada 2 h. De forma regular

se revisó el adecuado funcionamiento de las bombas de pecera y la limpieza de las mangueras que conducían el oxígeno hacia las soluciones nutritivas en cada tina.

4.7.5. Reposición del agua evapotranspirada

En cada tina, se repuso el agua perdida por evapotranspiración, para mantener el volumen de las soluciones constante a 11 L. La reposición de agua se realizó cada que se perdían 0.5 L por tina durante el periodo de 6 a 49 d después del trasplante; posteriormente, la reposición de agua se hizo diariamente, dado el crecimiento de las plantas que implica mayor demanda de agua. La reposición se hizo con agua acidula (pH=5.5) y se llevó un registro de la cantidad suministrada por tina y fecha (**Figura 7D**).

4.7.6. Aplicaciones de insecticida y fungicida

Dada la incidencia de mosquita blanca (*Bemisia tabaco*) en tomate y a lo que se identificó visualmente como roya del sorgo (*Puccinia purpurea*); se aplicó Confidor® 350 SC (Bayer, i. a. imidacloprid) al follaje del tomate a los 10 y 32 d después del trasplante a una dosis de 0.75 mL·L⁻¹. Y se asperjó el fungicida Ridomil Gold® Bravo SC (Syngenta, i. a. mefenoxam y clorotalonil) al 0.5% tanto a tomate como a sorgo a los 25 d después del trasplante, y únicamente al sorgo a los 32 d después del trasplante.

4.7.7. Cambio del polifoam

De manera regular después de los 13 d después del trasplante se sustituyó el polifoam que servía como sostén de las plantas, mismo que fue previamente lavado con hipoclorito de sodio al 10%. Esta actividad se realizó dada la incidencia de algas en el polifoam.

4.7.8. Tutorio de plantas

Se realizó un tutorio con rafia negra lavada con hipoclorito de sodio al 10%, en tomate a los 16 d después del trasplante y en sorgo a los 25 d después del trasplante. Posteriormente se realizaron ajustes necesarios en el tutorio para mantener a las plantas erguidas y con el soporte adecuado.

4.8. Variables evaluadas

4.8.1. Variables de crecimiento y reproductivas

Para determinar altura de la planta, diámetro de tallo, longitud de hojas, volumen y longitud de raíz, área foliar, biomasa fresca y seca, y toma de fotografías se utilizaron las mismas plantas para ambas especies.

Altura de planta (cm). Se determinó en tomate y sorgo después de 10 y 3, 15 y 8, 20 y 13, 25 y 18, y 30 y 23 d del inicio de tratamientos con Si y NaCl, empleando un flexómetro (Truper, FIN-55M, México). En tomate se hizo midiendo desde la base del tallo hasta el ápice. En sorgo, esta evaluación se realizó midiendo desde la base del tallo principal hasta la hoja bandera.

Diámetro de tallo (cm). En tomate y sorgo se midió a los 47 y 40 d de iniciados los tratamientos con Si y NaCl, es decir, a la conclusión de la fase de invernadero, usando un vernier (FUMETAX, SW-81390201, China). En ambos cultivos se midió a 5 cm de la base del tallo, en sorgo del tallo principal sin vainas.

Área foliar (cm²). Tanto en tomate como en sorgo a los 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl se determinó la variable con un integrador del área foliar (LI-COR® Biosciences, LI-3000A, Lincoln, NE, EE. UU.).

Longitud de raíz (cm). En tomate y sorgo se midió a los 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl, a la conclusión de dichos tratamientos. Se realizó con una regla de plástico de 50 cm (Sabonis, Argentina), de la punta de la raíz más larga al extremo de corte con el tallo.

Volumen de raíz (cm³). Se determinó en tomate y sorgo a los 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl, a la conclusión de dichos tratamientos, mediante una probeta de 500 mL de plástico por el desplazamiento de agua al sumergir la raíz.

Longitud de hojas (cm). Se evaluó sólo en tomate a los 14 y 7, 21 y 14, 28 y 21, 35 y 28, y 44 y 37 d de iniciados los tratamientos con Si y NaCl mediante un flexómetro

(Truper, FIN-55M, México). Se hizo en las hojas verdaderas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, y 10, contadas de la base al ápice.

Número de hojas verdaderas. Únicamente en tomate a los 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl, se realizó el conteo manual de las hojas verdaderas que al momento formaban parte de la planta.

Número de flores. Esta variable solo se evaluó en tomate después de 28 y 21 d de iniciados los tratamientos con Si y NaCl. Se realizó un conteo manual de la presencia de flores tanto abiertas como en botón en el primer racimo.

Número de macollos. Esta variable solo se evaluó en sorgo a los 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl, a la conclusión de dichos tratamientos. Se contabilizaron los macollos por plantas diferentes al tallo principal.

Peso de biomasa fresca de hojas (g). En tomate y sorgo se midió a los 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl utilizando una balanza analítica (OHAUS® Adventurer™Pro, AV213C; Parsippany, NJ, EE. UU.). Del material vegetal fresco colectado tras la conclusión de la fase de invernadero, en tomate se dividió la hoja pesando todos los folíolos juntos, y en otro apartado al raquis y peciolo. Para sorgo, se pesaron las hojas de toda la planta sin vainas, y por separado se pesaron todas las vainas de la planta.

Peso de biomasa fresca de peciolo (g). Esta variable se evaluó solo en tomate después de 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl utilizando la balanza analítica. Se pesaron exclusivamente los peciolo y raquis de hojas.

Peso de biomasa fresca de vainas (g). Esta variable se evaluó solo en sorgo después de 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl utilizando la balanza analítica. Se pesaron exclusivamente las vainas de los tallos principales del material vegetal fresco.

Peso de biomasa fresca de tallos (g). En tomate y sorgo se midió a los 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl utilizando la balanza analítica. En tomate se pesó el tallo, ramas de frutos y corolas de frutos cuajados sin hojas ni peciolo.

Mientras que, en sorgo se evaluó por separado el tallo principal y los tallos de macollos. En ambos casos fue de material vegetal fresco.

Peso de biomasa fresca de raíces (g). En tomate y sorgo se determinó a los 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl en la balanza analítica. En ambos cultivos, se pesó el corte de la raíz desde la base del tallo del material vegetal fresco cosechado.

Peso de biomasa fresca de frutos (g). Esta variable se evaluó solo en tomate después de 46 y 39 d después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl utilizando la balanza analítica. Del material vegetal fresco se pesaron frutos cuajados y flores con corola del primer racimo.

Peso de biomasa seca de hojas (g). En tomate y sorgo se evaluó a los 5 d después de finalizar la fase de invernadero utilizando la balanza analítica. Tanto en sorgo como en tomate, el material vegetal pesado se secó en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, Monterrey, México) a 72 °C durante 80 y 96 h, respetando el fraccionamiento como en biomasa fresca.

Peso de biomasa seca de peciolo (g). Esta variable sólo se determinó en tomate a los 5 d después de finalizar la fase de invernadero utilizando la balanza analítica. El material vegetal pesado se secó en la estufa de aire forzado a 72 °C durante 80 y 96 h.

Peso de biomasa seca de vainas (g). Esta variable sólo se determinó en sorgo a los 5 d después de finalizar la fase de invernadero utilizando la balanza analítica. El material vegetal pesado se secó en la estufa de aire forzado a 72 °C durante 80 y 96 h.

Peso de biomasa seca de tallos (g). En tomate y sorgo se evaluó a los 5 d después de finalizar la fase de invernadero utilizando la balanza analítica. Tanto en sorgo como en tomate, el material vegetal pesado se secó en la estufa de aire forzado a 72 °C durante 80 y 96 h. Se mantuvo el seccionamiento como en el peso de biomasa fresca.

Peso de biomasa seca de raíces (g). En tomate y sorgo se determinó a los 5 d después de finalizar la fase de invernadero utilizando la balanza analítica. Tanto en sorgo como

en tomate, el material vegetal pesado se secó en la estufa de aire forzado a 72 °C durante 80 y 96 h.

Peso de biomasa seca de frutos (g). Esta variable sólo se midió en tomate a los 5 d después de finalizar la fase de invernadero utilizando la balanza analítica. El material vegetal pesado se secó en la estufa de aire forzado a 72° C durante 80 y 96 h.

4.8.2. Variables fisiológicas

Conductancia estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Se midió después de 44 y 37 d posteriores al inicio de tratamientos con Si y NaCl en ambas especies. Se midió en la sexta hoja verdadera en tomate y en la tercera hoja ligulada del tallo principal en sorgo. Se realizaron cinco evaluaciones a lo largo del día, en tomate a las 7:10, 9:10, 15:10, 16:30 y 17:30 h, y en sorgo a las 7:25, 10:00, 16:40 y 18:10 h. Para lo anterior, se empleó un porómetro de hojas (Delta-T, AP4, Inglaterra) como se observa en la **Figura 8**.



Figura 8. Medición de conductancia estomática en hojas de tomate.

SPAD (Soil Plant Analysis Deveploment). Se evaluó en tomate a los 21 y 14, 28 y 21, 35 y 28, y 44 y 37 después de iniciados los tratamientos con Si y NaCl, y en sorgo a los 22 y 15, 29 y 22, 36 y 29, y 45 y 38 d. Para ambos cultivos las mediciones se hicieron a medio día con un medidor SPAD portátil (Konica Minolta Holdings Inc., Minolta SPAD-

502, Japón). En tomate se midió en la sexta hoja verdadera, y en sorgo en la tercera hoja ligulada del tallo principal.

4.8.3. Variables bioquímicas

Concentración de prolina. Esta evaluación se realizó a los 74 d después de terminar la aplicación de tratamientos Si y NaCl con material vegetal fresco que se mantuvo a -72 °C desde la cosecha en un ultracongelador (Thermo Fisher Scientific, REVCO ELITE SERIES, EE. UU.). En tomate se realizó la determinación para raíces, hojas, tallos (tallos, ramas de frutos y corolas de frutos cuajados), peciolos (peciolos y raquis de hojas) y frutos (frutos cuajados y flores con corola del primer racimo), mientras que en sorgo se hizo para raíces, tallo principal, vainas del tallo principal, tallos de macollos y hojas de toda la planta.

La cuantificación de prolina se realizó siguiendo la metodología de Bates *et al.* (1973) con modificaciones. De acuerdo con el tipo de muestra, se pesó entre 0.4 a 0.1 g de material vegetal fresco molido con nitrógeno líquido, el cual se homogeneizó con 5 mL de ácido sulfosalicílico al 3% en un mortero. El macerado se filtró con papel filtro No. 4 de 110 mm de diámetro (Whatman® Part of GE Healthcare, 1004110-100, New York, EE. UU.). Luego, en tubos de ensaye se agregaron 2 mL del filtrado, 2 mL de ninhidrina ácida y 2 mL de ácido acético glacial, se agitaron en el vórtex (Barnstead Thermolyne Corporation, Type 37600 Mixer, Minnesota, EE. UU.), hasta que se obtuvo una emulsión y se pusieron a baño María a 97 °C por 1 h, la reacción terminó con un choque térmico en tinas con agua y hielo. Una vez que se enfriaron las muestras, se agregaron 4 mL de tolueno y se mezclaron en el vórtex por 15 s. Con una micropipeta se tomó solo entre 1 y 2 mL de la fase superior de la emulsión que se colocaron en una celda de plástico para dar lectura en un espectrofotómetro (Jenway™ 6715 UV/VIS, EE. UU.) a 520 nm de absorbancia. Se utilizó tolueno como blanco para calibrar el equipo. Se hizo una curva por ronda de muestras analizadas (**Figura 9**), se implementó una solución madre de

prolina a una concentración de 400 nM mL⁻¹. La concentración de prolina fue determinada mediante la curva de calibración y al peso fresco.



Figura 9. Curva para la determinación de prolina.

Capacidad antioxidante. Se determinó a los 86 d después de concluir la aplicación de tratamientos Si y NaCl con material vegetal fresco que se mantuvo a -72 °C desde la cosecha en un ultracongelador (Thermo Fisher Scientific, REVCO ELITE SERIES, EE. UU.). En tomate se determinó para raíces, hojas, tallos (tallos, ramas de frutos y corolas de frutos cuajados), peciolo (peciolo y raquis de hojas) y frutos (frutos cuajados y flores con corola del primer racimo), mientras que en sorgo se hizo para raíces, tallo principal, vainas del tallo principal, tallos de macollos y hojas de toda la planta.

Siguiendo la metodología de varios autores (Castañeda *et al.*, 2008; Ibarra *et al.*, 2011; Kuskoski *et al.*, 2005) con modificaciones. Se pesó 0.1 g de material vegetal molido con nitrógeno líquido en tubos de reacción, se agregaron 1.5 mL de etanol al 60% y se dejó reposar por 24 h en refrigeración a -20 °C. Transcurrido el tiempo de reposo, se centrifugaron los tubos de reacción por 20 min a 4 °C a 15000 rpm. En otro tubo de reacción, se agregaron 400 µL del sobrenadante por muestra y 600 µL de metanol al 80%, se agitaron en un vórtex por 5 s. Luego, a cada muestra se le adicionó 1 mL de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) 0.38 mM, se agitó nuevamente en el vórtex y se dejó reposar por 15 min, momento en el cual se hizo la primera lectura en el espectrofotómetro (Jenway™ 6715 UV/VIS, EE. UU.), a una longitud de onda de 517 nm. También transcurridos los 30 y 60 min de incubación se tomó lectura. Se hicieron dos curvas de calibración por tanda de muestras analizadas, en este caso las curvas se hicieron con

trólox como antioxidante sintético, se implementó una solución madre de $100 \mu\text{g mL}^{-1}$. El blanco fue etanol al 60% y metanol al 80% en las proporciones requeridas según las mismas proporciones de las muestras.

Concentración de peróxido de hidrógeno. Se determinó a los 93 d después de finalizar la aplicación de tratamientos Si y NaCl con material vegetal fresco que se mantuvo a -72°C desde la cosecha en un ultracongelador (Thermo Fisher Scientific, REVCO ELITE SERIES, EE. UU.). En tomate se determinó para raíces, hojas, tallos (tallos, ramas de frutos y corolas de frutos cuajados), peciolo (peciolo y raquis de hojas) y frutos (frutos cuajados y flores con corola del primer racimo). Mientras que sorgo, se hizo para raíces, tallo principal, vainas del tallo principal, tallos de macollos y hojas de toda la planta.

La concentración de H_2O_2 se realizó en base a lo descrito por Ruiz *et al.* (2022) basado en Sergiev *et al.* (1997). Del material vegetal fresco y molido con nitrógeno líquido se transfirieron 0.1 g a tubos de reacción, los cuales se homogeneizaron con 1.2 mL de ácido tricloroacético al 1% en un vórtex durante 10 s. Luego, se centrifugaron por 20 min a 4°C a 15000 rpm. Se adicionaron 0.5 mL del sobrenadante y 0.5 mL de buffer fosfatos 10 mM pH 7 en tubos de ensaye en frío. En seguida, se agregó 1 mL de yoduro de potasio 1 M y se incubaron en oscuridad y en frío durante 1 h. Finalmente, se dio lectura en el espectrofotómetro (Jenway™ 6715 UV/VIS, EE. UU.) a una longitud de onda de 390 nm. Para determinar la concentración de H_2O_2 se utilizó una curva de referencia a base de una solución madre de $557 \mu\text{M}$ de peróxido de hidrógeno. Por tanda de muestras analizadas se realizaron dos curvas de calibración.

4.8.4. Concentración de nutrimentos, Si y Na

La determinación de la concentración nutrimentos, Si y Na se realizó al término del experimento (45 y 38 d posteriores al inicio del tratamiento con Si y NaCl, respectivamente). El material vegetal utilizado provino de raíces, hojas, tallos (tallos, ramas de frutos y corolas de frutos cuajados), peciolo (peciolo y raquis de hojas) y frutos (frutos cuajados y flores con corola del primer racimo) en tomate; en sorgo de raíces, tallo principal, vainas del tallo principal, tallos de macollos y hojas de toda la planta.

Estas muestras por órgano se colocaron en bolsas de papel, se etiquetaron y se secaron a 72 °C, durante 80 y 96 h para tomate y sorgo, respectivamente; en una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, Monterrey, México). Posteriormente, las muestras se molieron para obtener un tamaño de partícula menor a 2 mm. Este material seco y molido fue empleado como se indica a continuación.

Concentración de N y Si. Para la cuantificación de N se realizó una digestión de 0.25 g del material vegetal seco y molido en tubos de ensayo, se agregó 2 mL de ácido sulfúrico-perclórico (2:1, v:v) y 1 mL de H₂O₂, se dejaron reposando por 24 h. Las muestras se colocaron en una parrilla a 400 °C, se dejaron hasta que la muestra se volvió transparente y tuvo un volumen de aproximadamente 1 mL. Posteriormente, las muestras se retiraron de la parrilla y se aforaron con agua desionizada a 25 mL. Del extracto resultante se tomaron 10 mL, mismos que fueron destilados junto con 10 mL NaOH 50%. El destilado resultante fue colectado en matraces Erlenmeyer con 20 mL H₃BO₃ 4% conteniendo 4 gotas de mezcla de indicadores (verde de bromocresol y rojo de metilo en etanol). Se realizó la titulación de las muestras empleando H₂SO₄ 0.05 N (Alcántar y Sandoval, 1999). Por otra parte, la concentración de Si fue determinada por lectura directa en el extracto en un equipo de espectroscopia de emisión óptica de inducción por plasma acoplado (ICP-OES; Agilent 725-ES; Santa Clara, California, EE. UU.).

Concentración de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Na. Se realizó una digestión de 0.5 g de material seco y molido con 5 mL de una mezcla de ácido nítrico y ácido perclórico (2:1, v:v) para la cuantificación de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Na. Posteriormente, en una parrilla a 130 °C se dejaron hasta que la muestra se volvió transparente y de 1 mL, se retiró de la parrilla para aforarse con agua desionizada a 25 mL. Se filtró con papel filtro de poro medio en recipientes de plástico previamente etiquetados (Alcántar y Sandoval, 1999). Los extractos fueron leídos en un equipo de espectroscopia de emisión óptica de inducción por plasma acoplado (ICP-OES; Agilent 725-ES; Santa Clara, California, EE. UU.).

Concentración de cloruro. Con base a la metodología descrita por Alcántar y Sandoval (1999), se pesaron 0.5 g de material vegetal seco, molido y tamizado con malla 35 (< 0.5 mm) en tubos de aforo de 25 mL y se le adicionó a cada tubo 4 mL de ácido nítrico

concentrado dejando reposar por 72 h. Los tubos se colocaron en una parrilla a una temperatura entre 105 y 147 °C aproximadamente 1 h hasta bajar el volumen a 1 mL, y sin dejar secar la muestra. Al llegar a este punto se retiraron los tubos y se dejaron enfriar por alrededor de 30 min, enseguida se les adicionó 4 mL de H₂O₂ al 30% a cada tubo, y se volvieron a poner en la parrilla bajo el mismo rango de temperatura, el peróxido de hidrógeno se continuó adicionando, ya sin retirar los tubos de la parrilla, hasta que las muestras se tornaron incoloras-transparentes. Al reducirse el volumen de la muestra incolora a 1 mL, se retiró de la parrilla y se dejó enfriar. Una vez listos todos los tubos al volumen requerido, se trabajó en tandas de 12 muestras, por lo que se volvían a poner por 5 min en la parrilla para evitar precipitados. Luego, se vació la muestra del tubo a un matraz volumétrico de 10 mL con ayuda de un embudo de plástico, se enjuagó el tubo con agua destilada y se vertió nuevamente en el matraz, e inmediatamente se aforó con agua destilada. El extracto aforado se filtró con papel filtro de poro medio en frascos de vidrio previamente etiquetados. Posteriormente, en tubos de ensaye de 10 mL se transfirió una alícuota de 1 mL de la muestra digestada, 0.5 mL de ácido nítrico concentrado y 3.5 mL de agua destilada para llegar a un volumen final de 5 mL. Las muestras se leyeron en un espectrofotómetro (Milton Roy®, Spectronic 20+, EE. UU.), a 400 nm. Previo a la lectura se adicionaron a cada muestra 2 gotas de AgNO₃ al 10% y se agitaron en un vórtex. Para la estimación de la concentración de cloruro se hizo una curva de calibración de 0 a 10 mg L⁻¹, teniendo como base una solución madre de 50 mg L⁻¹, cuando la concentración en las muestras fue mayor, se realizaron diluciones 1:10 (v:v) con agua destilada.



Figura 10. Aforo de la muestra a 10 mL para la determinación de cloruro.

4.8.5. Variables anatómicas y cualitativas de raíces

Después de 10 d del periodo de tratamientos se tomaron muestras frescas de raíces de ambas especies, desde la base del tallo y hasta 5 cm hacia la punta de la raíz realizando cortes transversales. Para la obtención de imágenes de la anatomía de la raíz, algunos cortes se colocaron en frascos de vidrio con glutaraldehído al 3% como fijador, en amortiguador fosfato Sorensen 0.1 M a pH 7.2. Los frascos se guardaron en un refrigerador a 4 °C hasta su procesamiento. Otros cortes, así como secciones enteras de raíces, se guardaron en bolsas de papel pequeñas que se mantuvieron a temperatura ambiente en una habitación oscura para su posterior microanálisis cualitativo con el microscopio electrónico de barrido por espectroscopia de rayos-X de energía dispersiva (EDS-SEM, por sus siglas en inglés). A continuación, se describen las metodologías realizadas.

Anatomía de raíces. La variable se evaluó en ambas especies a los 54 d después de finalizar la aplicación de tratamientos Si y NaCl. A las muestras que se encontraban en los frascos de vidrio con fijador en amortiguador fosfato Sorensen, se les extrajo el fijador usando una pipeta Pasteur, evitando el contacto con el tejido para no dañarlo. Se realizaron tres lavados de 10 min con amortiguador fosfato 0.1 M pH 7.2 en cada frasco. Al terminar el último lavado se retiró el amortiguador y se agregó alcohol etílico al 30%, iniciando así la deshidratación, cada 40 min se hicieron los siguientes cambios de concentración en el alcohol etílico: 40, 50, 60, 70, 80, 90% y dos veces con 100% (**Figura 11A**). En el último cambio de etanol absoluto las muestras se colocaron en bolsas hechas

de limpiadores ópticos (Brinkmann Instruments, EE. UU.), para así poderlas introducir en el desecador de punto crítico (Tousimis Research Corporation, Samdri®-780, EE. UU.), donde se mantuvieron a una temperatura de 40 °C y una presión de 1250 psi. Al salir del desecador, las muestras se retiraron de las bolsas y se montaron sobre portamuestras de latón con cinta adhesiva de aluminio. Finalmente, las muestras se recubrieron de oro-paladio con un ionizador (JEOL FINE COAT, ION SPUTTER JFC-1100, Japón). Al concluir el recubrimiento se procedió a observar las muestras en el microscopio electrónico de barrido (JEOL, JSM-6390, Japón).

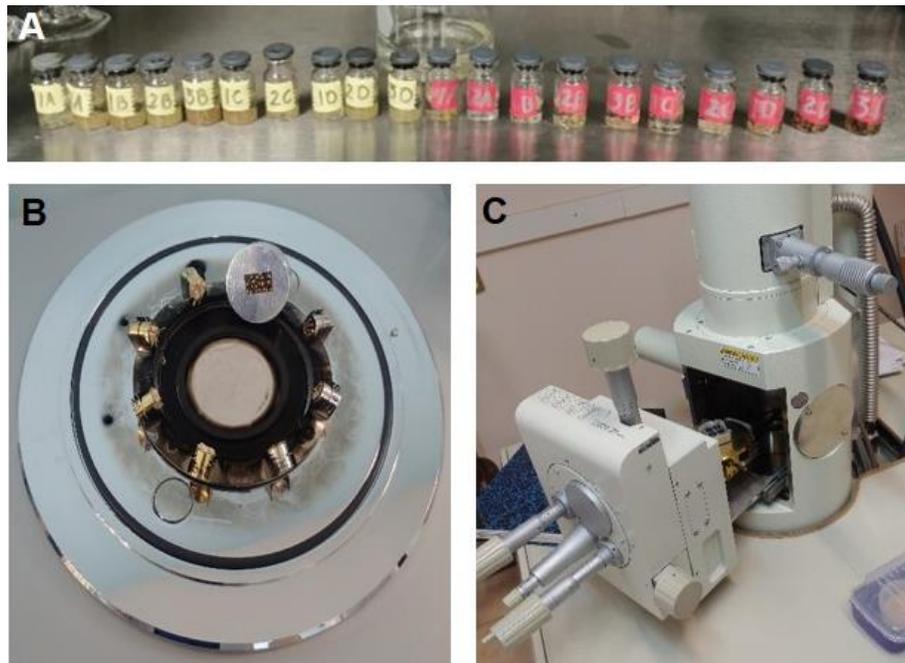


Figura 11. Preparación de muestras de raíz. Proceso de deshidratación de las muestras en una serie en gradiente de etanol (A). Recubrimiento de muestras con oro-paladio con la ionizadora (B). Montaje de muestras para su observación en SEM (C).

Análisis cualitativo de EDS-SEM

Después de concluir el tratamiento con Si y NaCl a los 61 d, las muestras que se encontraban en las bolsas de papel, al no identificarse secciones húmedas en las raíces, se seccionaron en cortes transversales y se montaron en portamuestras de latón con cinta adhesiva de carbón. Luego se recubrieron con oro-paladio en una ionizadora (JEOL FINE COAT, ION SPUTTER JFC-1100, Japón) como se observa en la **Figura 11B**,

quedando listas para su análisis usando un detector de energía dispersiva (Oxford Instruments, EDS, Inca X-ACT, Inglaterra) acoplado al microscopio electrónico de barrido. Se seleccionaron tres tejidos por portamuestras, y a cada tejido se le realizó el análisis EDS-SEM (**Figura 11C**), en las siguientes regiones de la raíz: epidermis, córtex, endodermis y haz vascular enfocado a xilema. La identificación de los elementos detectados fue en base a los picos de absorbancia en el espectro y a los resultados obtenidos en porcentajes relativos.

4.9. Análisis estadístico

Se utilizó el paquete estadístico SAS 9.0 para el análisis de datos, tanto de variables de crecimiento, reproductivas, bioquímicas y de concentración de nutrimentos, así como de Si y NaCl, considerando para el análisis de varianza los experimentos factoriales (efectos principales y de interacción) con tratamientos distribuidos completamente al azar; asimismo, se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey solo a las variables que cumplieron con las pruebas de distribución normal, independencia de datos y de homogeneidad de varianzas. Los datos de las variables que no cumplieron con dichas pruebas se analizaron como variables no paramétricas mediante la prueba de Kruskal-Wallis.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL

5.1. Condiciones climáticas

Dentro del invernadero, durante el día se registraron valores mínimos y máximos de temperatura y humedad relativa de 3.31 y 48.49 °C, y 21.6 y 68.8% (promedio de 28.32 °C y 26.35%) respectivamente, con una intensidad luminosa promedio de 74.05 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Por la noche, la temperatura y humedad relativa registró valores mínimos y máximos de 0.29 y 21.33 °C, y 23.9 y 69.7% respectivamente.

En tomate, se presenta un buen desarrollo entre los 20-30 °C y 60-80% de humedad relativa. Los máximos de temperaturas diurnas reportados en el invernadero pudieron afectar la fecundación de frutos, mientras que los mínimos nocturnos el desarrollo de la planta, así mismo, la humedad relativa mínima registrada pudo afectar la polinización (López-M. L. M., 2016). Para el caso del sorgo, se requieren temperaturas promedio de 27 °C sin bajar de 6 °C, ya que bajas temperaturas pueden comprometer la floración (Gutiérrez, 2003) a pesar de que se mantiene el crecimiento vegetativo (Ruíz *et al.*, 2013). Asimismo, para esta especie, la humedad relativa óptima entre 50-60% (Pérez *et al.*, 2010).

Además, el potencial hídrico de la atmósfera mínimo y máximo en el día fue de -195.03 MPa y -55.37 MPa (promedio -185.08 MPa) respectivamente, y por la noche de -180.17 MPa y -48.93 MPa (promedio -84.94 MPa) respectivamente. Valores mucho menores a los presentes en plantas con problemas de salinidad (-2.2 MPa), y similares a una atmósfera promedio (-90 MPa) (Villar *et al.*, 1997; Lucero *et al.*, 2017).

5.2. Crecimiento vegetativo y reproductivo y biomasa en relación a la CE y agua evapotranspirada de la solución nutritiva

La CE de las soluciones nutritivas se evaluó como variable no paramétrica (ver **Anexo A**), y fue significativa en ambos cultivos (ver **Anexo B**). Para tomate, la mediana en el testigo (2.203 dS cm^{-1}) y tratamiento con 2 mM Si (2.538 dS cm^{-1}) representaron los valores más bajos, mientras que el tratamiento 100 mM NaCl (12.445 dS cm^{-1}) y Si+NaCl (13.145 dS cm^{-1}) los más altos, en aproximadamente 500% más altos que los otros. De

igual forma, en sorgo, la mediana en el testigo (2.412 dS cm^{-1}) y tratamiento 2 mM Si (2.902 dS cm^{-1}) representaron los valores más bajos, mientras que el tratamiento 100 mM NaCl ($13.155 \text{ dS cm}^{-1}$) y Si+NaCl (13.19 dS cm^{-1}) fueron los más altos, siendo en más de un 450% superiores a los tratamientos más bajos. Los valores reportados para los tratamientos no salinos son acordes a una solución nutritiva para hidroponía, así mismo, para los tratamientos salinos, los valores de CE son congruentes con lo reportado para un aplicación de 100 mM NaCl en hidroponía (Esquivel, 2017; Lucero *et al.*, 2022). Para tomate, bajo condiciones no salinas para una solución nutritiva drenada, se ha reportado una CE de hasta 4.03 dS cm^{-1} (de la Rosa *et al.*, 2016).

El agua evapotranspirada también se evaluó como variable no paramétrica (ver **Anexo A**), y fue significativa en ambos cultivos (ver **Anexo B**). En tomate, la mediana para el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl (320 mL) indicó una reducción en su demanda de agua respecto al testigo (875 mL) y al tratamiento 2 mM Si (750 mL) en 36.57% y 42.66% respectivamente; mientras que, para 100 mM NaCl (375 mL) disminuyó a 42.85% y al 50%, respectivamente. En el caso del sorgo, al igual que en tomate, el tratamiento Si+NaCl (370 mL) fue el de menor reposición de agua e indicó una reducción del testigo (1000 mL) y del tratamiento 2 mM Si (1125 mL) al 37 y 32.88% respectivamente; mientras que, en el tratamiento 100 mM NaCl (410 mL) se redujo al 41% del testigo y al 36.44% del tratamiento 2 mM Si.

En los **Cuadro 1 y 2**, se observa que el factor Si y la interacción Si x NaCl no tuvieron efectos significativos en las variables altura de la planta, diámetro del tallo y área foliar, tanto en tomate como en sorgo. Mientras que, el factor NaCl si tuvo un efecto significativo en todas las variables antes mencionadas, excepto en la altura de planta en sorgo. En tomate, la altura de la planta se redujo 30% aproximadamente en los tratamientos con suministro de NaCl respecto al testigo y a la aplicación de 2 mM Si. En el diámetro del tallo, el suministro de 100 mM NaCl para tomate, ocasionó una disminución del 10% aproximadamente, mientras que, en sorgo el decremento fue de 30% aproximadamente. En tomate, el área foliar con aplicación de 100 mM NaCl, decreció más de 50%, tanto respecto del testigo como respecto del tratamiento con 2 mM Si. Para el caso del sorgo,

esta disminución fue aún mayor, en más de un 65% en relación al testigo y en poco más del 70% respecto a la aplicación con Si.

Cuadro 1. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la altura de la planta y diámetro de tallo en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Altura de planta (cm)		Diámetro de tallo (cm)	
		Tomate	Sorgo	Tomate	Sorgo
0	0	76.93±5.03a	59.86±11.94a	0.801±0.06ab	0.913±0.173a
0	100	57.77±3.26b	61.25±22.67a	0.734±0.05b	0.642±0.072b
2	0	79.78±4.02a	61.93±12.61a	0.833±0.06a	0.965±0.14a
2	100	53.47±5.75b	64.11±11.02a	0.727±0.07b	0.66±0.105b
Si (mM)					
0		65.9±10.59a	60.7±18.57a	0.761±0.064a	0.750±0.180a
2		64.0±14.23a	63.24±11.29a	0.770±0.08a	0.782±0.193a
NaCl (mM)					
0		78.35±4.59a	60.9±11.76a	0.817±0.065a	0.939±0.153a
100		55.50±5.11b	62.68±17.35a	0.731±0.062b	0.651±0.08b
Significancia^y					
Si		NS	NS	NS	NS
NaCl		***	NS	**	***
Si x NaCl		NS	NS	NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

En el **Cuadro 3**, se muestra que la longitud de raíz en tomate (variable no paramétrica, ver **Anexos 1y 3**) y sorgo, y volumen de raíz en tomate, no mostraron significancia estadística. En cambio, volumen de raíz en sorgo tuvo efecto significativo con el factor Si, mostrando que con la aplicación de Si, se incrementa el volumen de raíz en un

311.76% respecto del testigo y en un 246.97% del tratamiento salino. Bajo condiciones de salinidad, con Si aumenta un 54.97% el volumen, a que, si no hubiera aplicación de Si.

Cuadro 2. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el área foliar de tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Área foliar (cm ²)	
		Tomate	Sorgo
0	0	1411.35±327.35a	3925.51±814.90a
0	100	611.60±109.74b	1359.53±197.58b
2	0	1353.26±127.23a	4591.27±1381.0a
2	100	608.87±166.20b	1266.53±259.81b
Si (mM)			
0		967.05±473.15a	2385.92±1413.8a
2		906.62±410.49a	2596.43±1902.87a
NaCl (mM)			
0		1382.30±232.0a	4258.39±1108.42a
100		610.11±136.49b	1313.03±225.36b
Significancia^y			
Si		NS	NS
NaCl		***	***
Si × NaCl		NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

En el **Cuadro 4**, se observa que ninguna de estas variables presento significancia en el factor Si o en interacciones Si × NaCl. Únicamente para el factor NaCl, hubo significancia estadística en longitud de las hojas, 3, 4, 5, 9 y 10, excepto en No. de flores que no fue significativo. En las hojas 3, 4, 5, 9 y 10 con tratamiento salino, la longitud se redujo en

menos de un 80% respecto al testigo, y a poco más de un 80% respecto al tratamiento con Si.

Cuadro 3. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la longitud y el volumen de raíz en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Longitud de raíz (cm)	Volumen de raíz (cm ³)	
		Sorgo	Tomate	Sorgo
0	0	31.52±4.625a	42.5±9.57a	42.5±10.4b
0	100	31.06±5.65a	33.16±8.32a	50.11±32.19b
2	0	31.45±4.79a	50.17±9.16a	132.5±26.33a
2	100	30.55±5.08a	42.66±16.97a	77.66±71.5ab
Si (mM)				
0		60.7±18.57a	37.31±9.65a	47.07±0.050b
2		63.24±11.29a	45.67±14.25a	99.60±62.23a
NaCl (mM)				
0		60.9±11.76a	46.33±9.59a	87.5±51.55a
100		62.68±17.35a	38.34±14.01a	63.89±54.79a
Significancia ^y				
Si		NS	NS	*
NaCl		NS	NS	NS
Si x NaCl		NS	NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

La longitud de las hojas 6, 7 y 8 se evaluaron como variables no paramétricas (ver **Anexo A**), y resultaron significativas con la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). Se observa en el **Cuadro 5** que, en las hojas 6 y 7 los tratamientos salinos disminuyeron un 20%

aproximadamente del testigo y tratamiento Si. Mientras que, en la hoja 8 la reducción llegó alrededor del 25%.

Por su parte, la variable No. de macollos en sorgo también se evaluó como variable no paramétrica (ver **Anexo A**), pero no fue significativa estadísticamente (ver **Anexo B**)

En la biomasa fresca de todos los órganos de ambas especies, hubo significancia estadística del factor NaCl, pero no se registró significancia en el factor Si o interacción Si x NaCl (**Cuadros 6 y 7**). Excepto en frutos de tomate, donde fue significativa la interacción, con una diferencia de magnitud en el cambio del factor Si, mayor con el suministro de 100 mM NaCl que con 0 Mm NaCl, lo que indica que, hay cambios en el factor Si ante el suministro o no de NaCl en biomasa fresca (**Cuadro 6**). Para el caso de la vaina en sorgo, se evaluó como variable no paramétrica (ver **Anexo A**), y tuvo diferencias significativas entre los tratamientos (ver **Anexo B**).

Los tratamientos con salinidad disminuyeron respecto al testigo y al tratamiento con 2 mM Si, en poco más del 50% en tomate, y en aproximadamente 70% en sorgo (**Cuadro 6**). Para el caso del peciolo de tomate, la biomasa fresca disminuyó aproximadamente 60% con respecto al testigo y tratamiento 2 mM Si.

En biomasa fresca de tallo para tomate y del tallo principal en sorgo, se observó una disminución del 60% aproximadamente del testigo y tratamiento 2 mM Si. En el caso de tallo de macollos de sorgo, las pérdidas en biomasa fresca llegaron a casi el 80% respecto al testigo y tratamiento con 2 mM Si (**Cuadro 7**).

En biomasa fresca de raíces de plantas de tomate, se redujo en 75.9 y 69% con respecto al testigo y al tratamiento 2 mM Si respectivamente; mientras que, el tratamiento Si+NaCl presentó disminuciones menores de biomasa fresca de raíces en 90.2 y 82% con respecto al testigo y al tratamiento 2 mM Si respectivamente. En cambio, en sorgo, los dos tratamientos con salinidad (100 mM NaCl y 2 mM Si + 100 mM NaCl) tuvieron reducciones de biomasa fresca de raíces en aproximadamente 77.7% respecto al testigo y al tratamiento con 2 mM Si (**Cuadro 7**).

Cuadro 4. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la longitud de hojas verdaderas 3, 4, 5, 9 y 10, y en número de flores en tomate cv. El Cid F1.

Si (mM)	NaCl	Longitud de hojas verdaderas (cm)					No. de flores
		Hoja 3	Hoja 4	Hoja 5	Hoja 9	Hoja 10	
0	0	20.9±1.7a	24.6±1a	27.6±1.7a	26.1±1.8a	24.9±1.6a	8.5±0.5a
0	100	14.7±2.9c	18.2±2.5b	22.0±1.9b	21.9±3.9b	17.8±2.2b	7.6±1.1a
2	0	19.2±1.4ab	22.4±2.3a	27.1±1.1a	26.5±2.3a	23.7±4.5a	7.8±0.9a
2	100	16.4±3bc	18.4±3.1b	21.8±2.6b	18.3±1.9b	15.5±2.8b	7.8±0.7a
Si (mM)							
0		17.5±4.0a	21.0±3.8a	24.4±3.4a	23.7±3.8a	20.8±4.1a	8.0±4.1a
2		17.4±2.8a	20.0±3.3a	23.9±3.4a	21.6±4.6b	18.8±5.4a	7.8±5.4a
NaCl (mM)							
0		20.0±1.7a	23.5±2.0a	27.4±1.4a	26.3±2.0a	24.3±3.3a	8.1±0.8a
100		15.6±3.0b	18.3±2.7b	21.9±2.2b	20.0±3.4b	16.6±2.8b	7.7±20.9a
Significancia^y							
Si		NS	NS	NS	NS	NS	NS
NaCl		***	***	***	***	***	NS
Si x NaCl		NS	NS	NS	NS	NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 5. Medianas de variables no paramétricas. Longitud de raíz y hojas verdaderas 6, 7 y 8 en tomate cv. El Cid F1 y número de macollos en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Raíz	Hoja 6	Hoja 7	Hoja 8	Número de macollos
		(cm)				
0	0	33.7	29.0	29.6	31.6	17.5
0	100	41.6	23.9	24.0	23.7	15
2	0	32.3	29.0	31.0	31.7	20
2	100	41.2	24.0	24.2	22.5	8

En la biomasa seca de órganos de ambas especies no hubo interacciones significativas de los factores de estudio, excepto en frutos en tomate. Hubo efectos principales de NaCl significativos en todos los órganos de tomate y sorgo. Sin embargo, el efecto de Si, como factor principal, sólo fue significativo en tallo de tomate (**Cuadros 8 y 9**).

En biomasa seca de hojas (**Cuadro 8**), se encontraron tendencias contrarias en tomate y sorgo en los tratamientos salinos; pues mientras que, en tomate con el tratamiento 100 mM NaCl la biomasa se redujo en 57.1%, y en el tratamiento Si+NaCl la reducción fue de 64.6%, respecto testigo. Es decir que, la aplicación de 2 mM Si al tratamiento salino reduce aún más la biomasa a que si no se aplicara Si.

Caso contrario a la observado en sorgo, donde el tratamiento 100 mM NaCl redujo la biomasa seca de hojas en 50.4 y 60.2%, en cambio, con el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl, disminuyeron en 44.1 y 55.31% del testigo y tratamiento con 2 mM Si, respectivamente. Lo que significa que, al adicionar Si a condiciones de salinidad incrementa la biomasa en 6.21% del testigo y en un 4.98% del tratamiento 2 mM Si respecto al tratamiento 100 mM NaCl.

Cuadro 6. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el peso de biomasa fresca en tomate cv. El Cid F1 y en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas		Pecíolo	Frutos
		Tomate	Sorgo	Tomate	Tomate
(g)					
0	0	48.40±13.20a	79.09±23.5a	35.92±9.4a	42.31±11.6a
0	100	28.42±5.34b	26.07±4.6b	16.01±1.1b	12.40±5.8b
2	0	51.53±4.95a	69.64±17.2a	38.21±4.0a	57.72±30.0a
2	100	28.64±8.28b	22.84±5.09b	15.70±4.4b	3.44±2.5c
Si (mM)					
0		37.30±13.8a	47.28±30.7a	24.86±12.0a	25.69±17.7a
2		37.80±13.6a	41.56±26.41a	24.71±12.3a	25.16±33.0b
NaCl (mM)					
	0	49.97±9.38a	74.36±19.7a	37.07±6.8a	50.02±22.67a
	100	28.54±6.76b	24.46±4.9b	15.84±3.2b	7.51±6.22b
Significancia^y					
Si		NS	NS	NS	*
NaCl		***	***	***	***
Si x NaCl		NS	NS	NS	*

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 7. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el peso de biomasa fresca en tallo y raíz de tomate cv. El Cid F1 y de sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si	NaCl	Tallo			Raíz	
		Tomate	Sorgo		Tomate	Sorgo
			Principal	Macollos		
(mM)		(g)				
0	0	65.02±7.9a	23.10±10.2a	158.0±47a	42.90±17a	175.26±44.0a
0	100	26.82±1.9b	8.60±3.3b	35.19±7.3b	32.56±8.1a	41.60±10.6b
2	0	60.55±5.8a	23.96±2.7a	150.4±16a	47.17±8.0a	180.30±33.3a
2	100	22.68±4.5b	10.99±3.7b	32.33±8.8b	38.6±16.8a	37.78±9.0b
Si (mM)						
0		43.80±20.7a	14.40±9.8a	84.3±69.2a	37.1±13.5a	95.07±73.9a
2		37.23±20.6b	16.18±7.4a	79.5±69.0a	42.0±14.1a	94.82±76.4a
NaCl (mM)						
0		62.79±6.8a	23.52±6.9a	154.2±32a	45.0±13.1a	177.82±36.2a
100		24.02±4.3b	9.80±3.5a	33.76±7.9b	35.8±13.3b	39.69±9.6b
Significancia^y						
Si		NS	NS	NS	NS	NS
NaCl		***	***	***	NS	***
Si x NaCl		NS	NS	NS	NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Considerando que la vaina en sorgo y el peciolo en tomate, son estructuras de soporte y unión (Taiz & Zeiger, 2002), en peciolo, tanto el tratamiento 100 mM NaCl como el Si+NaCl disminuyeron a casi un 40% respecto al testigo y tratamiento 2 mM Si. Mientras que, en vaina de sorgo, el tratamiento 100 mM NaCl disminuyó la biomasa seca en

aproximadamente 35% respecto al testigo y del tratamiento 2 mM Si, y en el tratamiento Si+NaCl bajó en 25% aproximadamente (**Cuadro 8**). Caso contrario a lo ocurrido en hojas de sorgo, lo que se podría asociar con una compensación al perder biomasa en vaina y ganarlo en hojas antes situaciones de estrés.

En frutos de tomate (**Cuadro 8**), el tratamiento Si+NaCl se redujo en casi 40% respecto al tratamiento 100 mM NaCl sin Si. En cuanto al peso de biomasa seca de raíces (**Cuadro 9**), en tomate no hubo diferencias significativas entre tratamientos. En cambio, en sorgo, con el tratamiento 100 mM NaCl la biomasa seca disminuyó en 30% aproximadamente respecto al testigo y al tratamiento 2 mM Si. En el tratamiento Si+NaCl la reducción en el peso de biomasa seca de raíces fue de casi un 25% con respecto al testigo y al tratamiento 2 mM Si, es decir que, la adición de Si no mejora esta característica ante situaciones de estrés salino.

En el **Cuadro 9**, se observa que el tratamiento 20 mM Si en el tallo del tomate disminuyó la biomasa seca alrededor del 15%, mientras que, el tratamiento 100 mM NaCl la redujo 56% y el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl causó un decremento de 65%, respecto del testigo. La aplicación de 2 mM Si en condiciones de salinidad redujo la biomasa seca del tallo en 20% aproximadamente, respecto al tratamiento 100 mM NaCl. Para el tallo principal de sorgo, la disminución en biomasa seca fue del 65% aproximadamente en el tratamiento 100 mM NaCl, respecto al testigo y al tratamiento 2 mM Si. Mientras que, el tratamiento Si+NaCl fue de alrededor del 70%. Al igual que en tomate, resultó perjudicial la adición de 2 mM Si bajo salinidad para la biomasa seca del tallo principal (**Cuadro 9**). El tallo de macollos se evaluó como variable no paramétrica (ver **Anexo A**), y fue estadísticamente significativa (ver **Anexo B**). Se observa en el **Cuadro 10**, que las medianas en biomasa seca del testigo y del tratamiento 2 mM Si fueron muy similares. La mediana del tratamiento 100 mM NaCl mostró una disminución del 50% aproximadamente, mientras que del tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl fue del 60% aproximadamente, ambos respecto al testigo y tratamiento 2 mM Si.

En la vaina principal de sorgo, las medianas de los tratamientos salinos mostraron reducciones de biomasa fresca del 60% aproximadamente, respecto al testigo y al tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 10**).

Cuadro 8. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el peso de biomasa seca en tomate cv. El Cid F1 y de sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas		Pecíolo	Vaina		Frutos
		Tomate	Sorgo	Tomate	Sorgo	Tomate	
(g)							
0	0	4.89±1.1a	2.90±0.9ab	7.74±2.0a	26.96±14.53a	3.09±0.6a	
0	100	2.10±1.1b	1.44±0.5c	2.92±0.9b	9.56±2.46b	1.59±0.6bc	
2	0	4.01±2.0ab	3.62±0.9a	7.75±0.5a	25.94±2.6a	2.56±1.3ab	
2	100	1.73±0.4b	1.62±0.4bc	2.88±0.9b	6.29±1.4b	0.49±0.3c	
Si (mM)							
0		3.21±1.8a	2.02±1.0a	5.06±2.9a	16.52±12.4a	2.26±0.9a	
2		2.64±1.6a	2.42±1.2a	4.83±2.6a	14.15±10.3a	1.32±1.3b	
NaCl (mM)							
0		4.45±1.5a	3.26±0.9a	7.74±1.3a	26.45±9.6a	2.82±1.0a	
100		1.91±0.8b	1.53±0.4b	2.90±0.8b	7.92±2.5b	0.99±0.7b	
Significancia^y							
Si		NS	NS	NS	NS	*	
NaCl		***	***	***	***	***	
Si x NaCl		NS	NS	NS	NS	NS	

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 9. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en el peso de biomasa seca en tallo y raíz de tomate cv. El Cid F1 y de sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Tallo		Raíz	
		Tomate	Sorgo Principal	Tomate	Sorgo
(g)					
0	0	9.75±0.9a	15.75±3.3a	2.76±0.7a	15.40±3.6a
0	100	4.30±0.4b	5.85±1.0b	1.50±0.2a	4.80±1.1b
2	0	8.48±0.9a	16.27±3.3a	2.98±0.3a	16.77±2.8a
2	100	3.42±0.8b	4.97±1.0b	1.87±0.8a	4.27±1.0b
Si (mM)					
0		6.72±2.9a	9.81±5.5a	2.06±0.8a	9.04±5.9a
2		5.44±2.7b	9.49±6.1a	2.31±0.8a	9.27±6.7a
NaCl (mM)					
0		9.11±1.1a	16.01±3.0a	2.87±0.5a	16.08±3.1a
100		3.82±0.8b	5.41±1.0b	1.70±0.6b	4.54±1.0b
Significancia^y					
Si		*	NS	NS	NS
NaCl		***	***	***	***
Si x NaCl		NS	NS	NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 10. Medianas de variables no paramétricas de biomasa en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Biomasa fresca de vaina	Biomasa seca de tallo de macollos
		(g)	
0	0	11.112	1.869
0	100	4.331	0.943
2	0	10.114	1.871
2	100	4.678	1.085

Tanto para tomate como para sorgo, los tratamientos salinos presentaron la CE más elevada y de menor reposición de agua. Evidenciando así, propiedades coligativas del agua, descenso en la presión de vapor, y quizás la propiedad más importante para funciones biológicas, presión osmótica, debido al incremento de solutos en la solución (por ejemplo, la salinidad), lo cual, termina dificultando el movimiento libre del agua para ser absorbida por las plantas. Ya que, el agua es vital para los procesos de crecimiento y desarrollo de los seres vivos (como las plantas), entonces al ser limitante el agua también dichos procesos de crecimiento y desarrollo (Taiz and Zeiger, 2002).

Ello se vio reflejado en las pérdidas de biomasa, tanto fresca como seca, bajo condiciones de salinidad en los órganos de ambas especies, fueron significativos al factor NaCl. Ante la aplicación de Si con salinidad en tomate, la biomasa fresca y seca a nivel de fruto mostró disminuciones respecto al testigo y al tratamiento 2 mM Si, mientras que, la biomasa seca a nivel de raíz no presentó diferencias significativas con ningún tratamiento (**Figuras 12 y 13**). Por su parte, en sorgo, el suministro de 2 mM Si + 100 mM NaCl ocasionó aumentos respecto a la aplicación de 100 mM NaCl en biomasa fresca para el tallo principal y vaina, mientras en biomasa seca para hojas y tallo macollo.

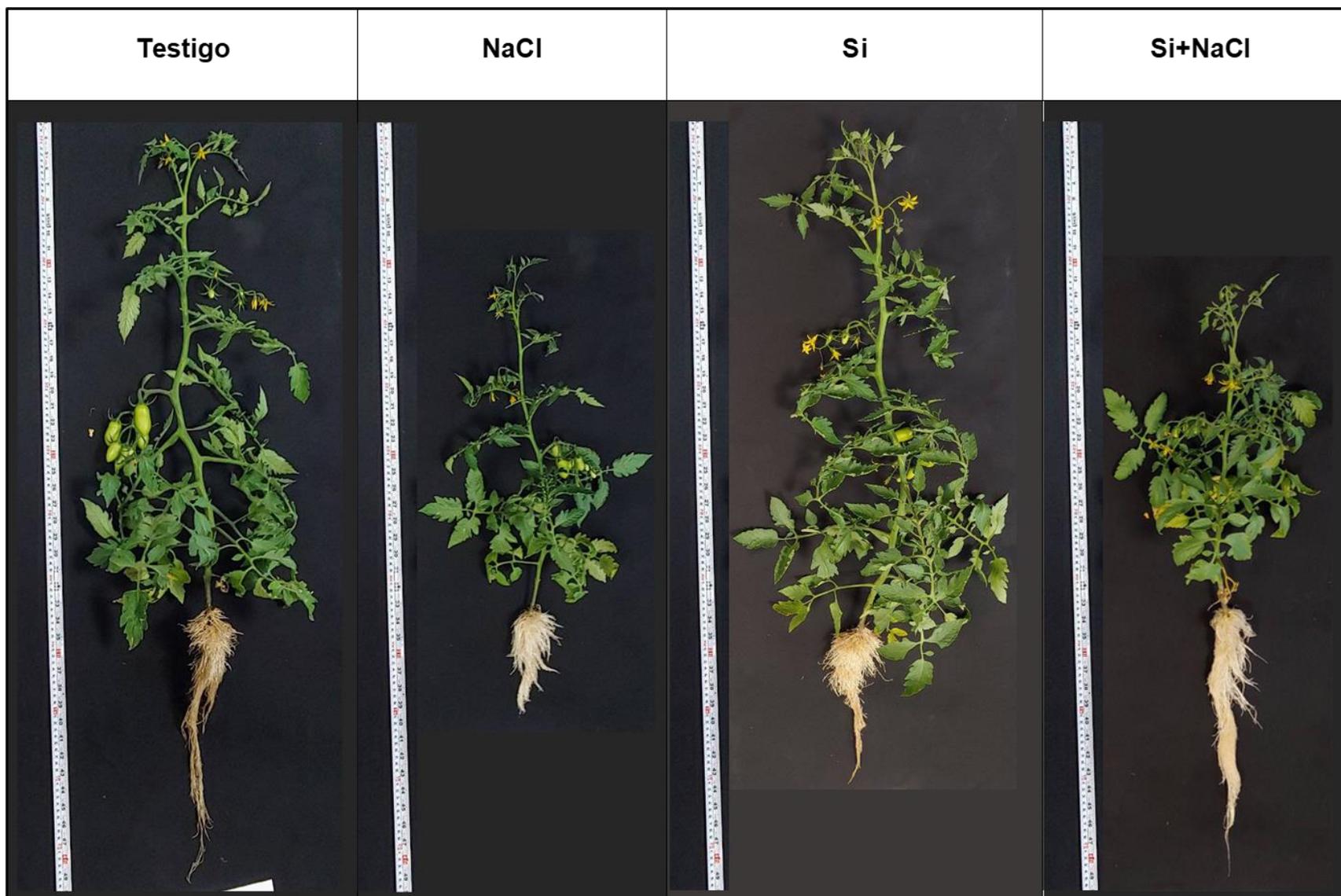


Figura 12. Efectos del Si y NaCl en el crecimiento del tomate var. El Cid.

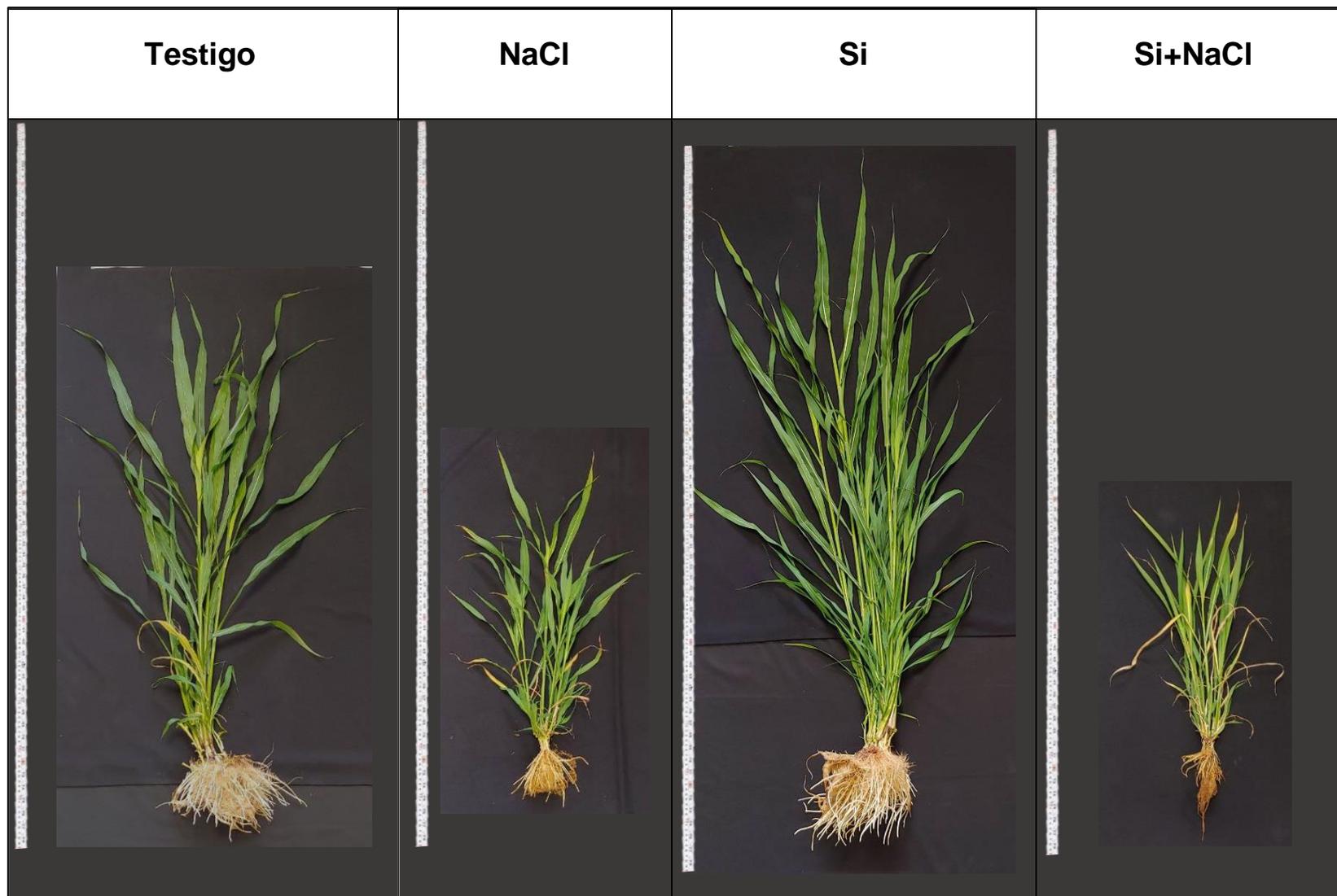


Figura 13. Efectos del Si y NaCl en el crecimiento del sorgo var. Kikappo.

En cuanto a la relación raíz/vástago de biomasa seca, en tomate hubo diferencias significativas entre tratamientos y por efecto de NaCl. Los efectos del factor Si y de la interacción de factores de estudio no fueron significativos (**Cuadro 12**). En el caso del sorgo, la variable se comportó como variable no paramétrica (ver **Anexo A**). y no fue significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**).

En tomate, el tratamiento Si+NaCl incrementó significativamente la proporción raíz/vástago en 97.88% respecto al testigo, es decir que, bajo condiciones de salinidad el suministro de 2 mM Si genera una disminución en el crecimiento del vástago de la planta, en relación a cuando no se aplica Si, pues el tratamiento 100 mM NaCl mostró diferencias significativas respecto al testigo. Mientras que, en sorgo, no hubo diferencias significativas entre tratamientos (**Cuadro 11**). Estos datos coinciden con reportes donde, el Si no mitiga las proporciones raíz/vástago bajo condiciones de salinidad (Yin *et al.*, 2016).

Cuadro 11. Efecto de los tratamientos en la relación raíz/vástago de biomasa seca en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Tomate	Sorgo
0	0	0.1229±0.0203a	0.3313 ^M
0	100	0.1709±0.0267ab	0.2608 ^M
2	0	0.1418±0.016ab	0.3643 ^M
2	100	0.2432±0.1099b	0.3133 ^M

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. *significancia estadística. ^MMediana de variable no paramétrica.

Cuadro 12. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la relación raíz/vástago de biomasa seca en tomate cv. El Cid F1.

Efectos principales			Significancia ^Y
Si (mM)	0	0.149±0.03a	NS
	2	0.202±0.09a	
NaCl (mM)	0	0.132±0.01b	**
	100	0.210±0.08a	
Interacción			NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^YNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

5.3. Efectos en conductancia estomática y SPAD en tomate y sorgo

Las variables fisiológicas evaluadas se comportaron como variables no paramétricas excepto SPAD en sorgo, evaluada como variable paramétrica (ver **Anexo A**). Únicamente SPAD en tomate tuvo diferencias significativas (ver **Anexo B** y **Cuadro 13**), donde, el tratamiento 100 mM NaCl disminuyó alrededor del 9%, y el tratamiento Si+NaCl bajó 12% aproximadamente respecto al testigo y al tratamiento 2 mM Si. Es decir que, la aplicación de Si no mejoró el valor de SPAD en condiciones de salinidad en tomate. En *Solanum lycopersicum* L., se reporta una mejora en el contenido de clorofila de las plantas con el suministro de 0.87 mM Si durante 7 d (Yin *et al.*, 2016), sugiriendo que la concentración y tiempo de tratamiento podrían afectar en esta variable. El nulo efecto de los tratamientos en la conductancia estomática bajo estrés salino, es contrario a lo reportado por Liu *et al.* (2014) bajo estrés osmótico en sorgo, o Hattori *et al.* (2005), también en sorgo, reportan cambios en la conductancia estomática por efecto del Si. Los efectos reportados se asocian con deposiciones de Si en hojas como protección ante pérdidas de agua en la transpiración (Frew *et al.*, 2018; Coskun *et al.*, 2019). Sin embargo, estos resultados indicarían que aun con aplicaciones de Si con y sin estrés no hay un transporte eficiente o funcional de Si a la parte área en ambas especies que permitan su acumulación.

Cuadro 13. Variables fisiológicas en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Conductancia estomática (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		SPAD	
		Tomate	Sorgo	Tomate	Sorgo
0	0	47.5 ^M	57.5 ^M	56.3 ^M	36.23±6.5a
0	100	34 ^M	27.4 ^M	51.35 ^M	36.93±6.6a
2	0	55 ^M	28.8 ^M	56.4 ^M	38.98±5.5a
2	100	46.5 ^M	38 ^M	49.55 ^M	36.63±6.03a

Medias ± DE con letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^MMediana de variable no paramétrica.

5.4. Efecto de Si bajo salinidad en la concentración de prolina de tomate y sorgo

La concentración de prolina en tomate se presenta en el **Cuadro 14**. En raíces, el tratamiento 2 mM redujó 73.3% la concentración de prolina respecto al testigo, por el contrario, el tratamiento Si+NaCl lo superó en 200%. En hojas, peciolo y tallo sólo fue significativo el efecto principal de NaCl, en donde al adicionar 100 mM NaCl la concentración de prolina fue mayor. La concentración de prolina en fruto fue una variable no paramétrica significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). En hojas, peciolo y tallo, las mayores concentraciones de prolina se registraron en el tratamiento con Si y NaCl, con incrementos respecto al testigo de 1090, 517 y 466%, respectivamente.

En el **Cuadro 15**, se presentan los resultados de prolina registrados en sorgo. Se observa significancia estadística de la interacción de factores de estudio en la concentración de prolina en tallo principal y raíz de sorgo, donde la diferencia entre niveles de Si es mayor cuando se aplican 100 mM NaCl. La concentración de prolina en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl disminuyó 58.3% en raíces e incrementó 60.7% en tallo principal, en ambos casos respecto al tratamiento 100 mM NaCl.

Cuadro 14. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de prolina en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Pecíolo	Tallo	Raíz	Fruto
		(μmol prolina g peso fresco ⁻¹)				
0	0	0.10±0.02b	0.30±0.02b	1.25±0.2b	0.30±0.09b	0.243 ^M
0	100	0.97±0.1a	1.77±0.2a	7.15±0.8a	1.29±0.2a	1.799 ^M
2	0	0.10±0.04b	0.30±0.03b	1.61±0.3b	0.08±0.02c	0.199 ^M
2	100	1.19±0.2a	1.85±0.1a	7.08±0.4a	0.90±0.1a	4.259 ^M
Efectos principales						
Si (mM)	0	0.58±0.4a	1.07±0.5a	4.20±3.2a	0.84±0.5a	
	2	0.68±0.5a	1.11±0.2a	4.35±2.9a	0.49±0.4b	
NaCl (mM)	0	0.10±0.03b	0.30±0.03b	1.43±0.3b	0.23±0.1b	
	100	1.08±0.2a	1.81±0.1a	7.12±0.5a	1.10±0.2a	
Significancia [∧]						
Si		NS	NS	NS	***	
NaCl		***	***	***	***	
Si × NaCl		NS	NS	NS	***	

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
[∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente. ^M, mediana de variable no paramétrica.

En hojas, fue significativo el efecto principal de Si, en donde su adición redujo la concentración de prolina. Mientras que, el efecto principal de NaCl fue significativo en las concentraciones de prolina de tallos principales y de macollos, así como en raíces; donde en todos los casos se observa que la adición de NaCl las incrementa (**Cuadro 15**).

En vaina, la concentración de prolina fue una variable no paramétrica significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**); en ésta, se observan las mayores concentraciones con el suministro de 100 mM NaCl, independientemente de la presencia o ausencia de Si. Ambos tratamientos con 100 mM superaron la concentración de prolina en vaina registrada en el testigo en promedio en 311.76%.

Asimismo, al considerar el suministro de Si en tomate bajo la condición de salinidad sólo incrementó la concentración de prolinas en fruto 1648.97% del testigo y 137.43% del tratamiento 100 mM NaCl (**Cuadro 14**). Mientras que, en sorgo, con el suministro de 2 mM Si incrementó en tallo principal, independientemente de la condición de salinidad (**Cuadro 15**).

Mientras unos estudios reportan que, la presencia de silicio mejora el nivel de prolina en la planta bajo condiciones de salinidad, funcionando como un osmoprotectante (Cabezas *et al.*, 2022); otros indican que, con la adición de Si en cultivos como el sorgo, la concentración de prolina disminuye bajo estrés salino como respuesta a la mitigación de éste, causada por el Si (Liang *et al.*, 2015). Es de mencionarse que, en estudios anteriores se reportó que una proteína rica en prolina, fuertemente policatiónica y compuesta principalmente de lisina y arginina, cataliza y promueve la polimerización del ácido silícico, pues parece proporcionar microambientes catiónicos, lo que permite la polimerización de Si aún en soluciones de pH 6. Lo anterior, induce una mayor deposición de sílice en las paredes celulares (Kauss *et al.*, 2003), comprometiendo la cantidad de prolinas en complejos con Si.

Cuadro 15. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de prolina en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Tallo principal	Tallo macollos	Raíz	Vaina
		(μmol prolina g peso fresco ⁻¹)				
0	0	0.3±0.03a	0.2±0.01d	0.22±0.02b	0.1±0.03c	0.204 ^M
0	100	0.3±0.1a	1.3±0.09b	0.69±0.1a	0.6±0.09a	0.636 ^M
2	0	0.2±0.06a	0.2±0.02c	0.2±0.006b	0.3±0.02b	0.223 ^M
2	100	0.2±0.04a	2.0±0.1a	0.81±0.1a	0.2±0.01b	0.503 ^M
Efectos principales						
Si (mM)	0	0.3±0.08a	0.76±0.5b	0.45±0.2a	0.39±0.2a	
	2	0.2±0.05b	1.18±0.9a	0.50±0.3a	0.2±0.03b	
NaCl (mM)	0	0.3±0.07a	0.25±0.03b	0.21±0.01b	0.2±0.06b	
	100	0.28±0.1a	1.70±0.4a	0.75±0.1a	0.43±0.1a	
Significancia [∧]						
Si		*	***	NS	*	
NaCl		NS	***	***	***	
Si x NaCl		NS	**	NS	***	

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
[∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente. ^M, mediana de variable no paramétrica

5.5. Efecto del Si bajo salinidad en la capacidad antioxidante total de tomate y sorgo

Para la capacidad antioxidante en tomate, se observa que los efectos principales de factores de estudio y su interacción ocasionaron significancia estadística en peciolo y tallo (**Cuadro 16**). En peciolo, se registraron decrementos en la capacidad antioxidante en el tratamiento Si+NaCl de 25.5, 29.89 y 28.56% a los 15, 30 y 60 min, respecto al tratamiento 100 mM NaCl. Asimismo, la misma tendencia se observó en tallos donde a los 15, 30 y 60 min disminuyó la capacidad antioxidante en 31.3, 33.7 y 32.8%, respectivamente (**Cuadro 17**). En hojas y fruto a los 15, 30 y 60 min fue significativo el efecto principal de Si, en donde el tratamiento 2 mM Si redujo la capacidad antioxidante, mientras que, en raíz a los 15 y 30 min con 2 mM Si la capacidad antioxidante fue mayor. También en fruto fue significativo el efecto del NaCl, donde la adición de 100 mM NaCl incrementó la capacidad antioxidante (**Cuadro 16**).

En la capacidad antioxidante en sorgo, se observa significancia estadística del efecto de interacción de factores de estudio en la vaina a los 60 min y en raíz a los 30 min (**Cuadro 16**). La capacidad antioxidante a los 60 min en vaina se redujo en 34.8% en el tratamiento 100 mM NaCl y en 15.8% en el tratamiento 2 mM Si, con respecto al testigo. En raíces de plantas tratadas con 2 mM Si se registró un aumento de 115.12% a los 30 min, respecto al testigo. También fue significativo el efecto de la interacción de factores de estudio en vaina a los 15 min, observándose un decremento de 31.6% en el tratamiento 100 mM y de 10.65% en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl, respecto al testigo, asimismo, la CAT se disminuyó 13.97% con la aplicación de 100 mM NaCl respecto al tratamiento Si+NaCl (**Cuadro 18**). En tallo de macollo fue significativo el efecto principal de NaCl, en donde al adicionar 100 mM NaCl la capacidad antioxidante fue mayor. (**Cuadro 16**). La variable hojas, fue no paramétrica y significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**), observándose la menor capacidad antioxidante en el tratamiento 100 mM NaCl a los 15, 30 y 60 min, y la máxima en el testigo a los 15 min y en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl a los 30 y 60 min, además, en hojas a los 15 min con la aplicación de 100 mM NaCl disminuyó en 8.72% respecto al tratamiento Si+NaCl.

En varios estudios se involucra al Si en la mediación de los sistemas de defensa antioxidantes enzimáticos (superóxido dismutasa SOD, ascorbato peroxidasa y glutatión reductasa) y no enzimáticos (ascorbato y glutatión), tanto en monocotiledóneas como en dicotiledóneas bajo estrés salino (Liang *et al.*, 2015).

Cuadro 16. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la capacidad antioxidante en tomate cv. El Cid y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Variable	Efectos principales				Significancia			
	Si (mM)		NaCl (mM)		Si	NaCl	Si x NaCl	
	0	2	0	100				
Tomate	(μg trólox 100 μg de muestra⁻¹)							
	15 min	64.01±10.38a	50.15±6.11b	54.90±9.95a	59.26±12.04a	**	NS	NS
Hojas	30 min	72.21±11.45a	56.46±7.29b	61.88±11.85a	66.79±13.11a	**	NS	NS
	60 min	77.88±11.52a	62.99±8.28b	67.49±12.47a	73.38±12.35a	*	NS	NS
	15 min	45.38±9.95a	41.65±4.76a	40.19±6.68b	46.84±7.72a	NS	*	**
Pecíolo	30 min	50.82±11.97a	44.65±4.65b	43.82±7.21b	51.66±9.98a	*	*	***
	60 min	56.84±13.51a	50.74±5.24a	49.07±8.08b	58.51±10.72a	NS	**	***
	15 min	4.90±2.33a	2.52±1.21b	2.30±1.29b	5.12±1.98a	***	***	NS
Fruto	30 min	6.46±2.72a	4.48±1.60b	3.79±1.52b	7.14±1.87a	*	***	NS
	60 min	7.51±2.72a	4.64±1.40b	4.53±1.82a	7.63±2.29a	**	***	NS
	15 min	24.12±17.13a	23.44±8.17a	14.91±9.0b	32.65±9.98a	NS	***	*
Tallo	30 min	31.30±19.93a	28.87±7.99a	19.70±8.74b	40.47±11.90a	NS	***	**
	60 min	36.11±22.26a	33.82±9.64a	23.54±10.84b	46.39±13.26a	NS	***	**

		Efectos principales				Significancia		
		Si (mM)		NaCl (mM)		Si	NaCl	Si x NaCl
Variable		0	2	0	100			
	15 min	3.08±0.73b	5.37±1.17a	4.18±1.84a	4.27±1.21a	**	NS	NS
Raíz	30 min	2.85±0.66b	5.41±1.31a	4.15±2.10a	4.11±1.21a	***	NS	NS
	60 min	2.92±0.76a	4.15±1.54a	3.62±1.92a	3.45±0.34a	NS	NS	NS
Sorgo	15 min	8.6±2.0a	9.4±0.8a	9.9±1.6a	8.1±1.4b	NS	**	*
Vaina	60 min	12.65±2.98a	12.54±1.12a	14.11±1.68a	11.09±1.44b	NS	***	***
	15 min	4.66±1.02a	5.30±0.55a	4.84±0.59a	5.11±1.09a	NS	NS	NS
Tallo P	30 min	4.78±1.06a	4.91±0.75a	4.40±0.99a	5.29±0.54a	NS	NS	NS
	60 min	4.97±0.82a	5.28±0.74a	4.85±0.8a	5.41±0.68a	NS	NS	NS
	15 min	7.85±4.82a	9.48±5.35a	4.92±2.33b	12.41±3.99a	NS	***	NS
Tallo M	30 min	8.57±3.51a	10.39±6.0a	6.0±1.59b	12.96±4.49a	NS	**	NS
	60 min	8.32±4.50a	10.57±6.55a	5.34±1.92b	13.54±4.89a	NS	***	NS
	15 min	3.98±2.21a	5.71±2.48a	5.88±2.77a	3.81±1.62a	NS	NS	NS
Raíz	30 min	3.86±2.30a	5.73±2.49a	5.63±3.05a	3.97±1.63a	NS	NS	*
	60 min	4.02±2.60a	5.87±2.95a	6.12±3.23a	3.78±1.96a	NS	NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. √No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente. Tallo P., tallo principal; Tallo M., Tallo macollos.

Cuadro 17. Capacidad antioxidante en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas			Pecíolo			Fruto		
		15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min
(µg trólox 100 µg de muestra ⁻¹)										
0	0	60.70 ±10.4a	69.04 ±12.42a	73.91 ±14.05a	37.07 ±6.80b	40.91 ±8.28b	45.42 ±8.62b	3.02 ±1.36b	4.49 ±1.97b	5.40 ±2.03b
0	100	67.32 ±10.67a	75.39 ±11.16a	81.85 ±8.38a	53.69 ±0.87a	60.73 ±2.04a	68.26 ±2.03a	6.78 ±1.17a	8.43 ±1.76a	9.63 ±1.12a
2	0	49.09 ±5.74a	54.72 ±6.05a	61.06 ±7.45a	43.31 ±5.66b	46.72 ±5.50b	52.72 ±6.52b	1.58 ±0.80b	3.10 ±0.45b	3.66 ±1.27b
2	100	51.20 ±7.16a	58.19 ±8.91a	64.91 ±9.72a	40.0 ±3.69b	42.58 ±2.98b	48.77 ±3.34b	3.45 ±0.67b	5.86 ±0.84a b	5.63 ±0.61b

Si (mM)	NaCl (mM)	Tallo			Raíz		
		15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min
(µg trólox 100 µg de muestra ⁻¹)							
0	0	9.54 ±3.84c	13.93 ±4.32c	16.73 ±4.67c	2.90 ±0.66b	2.68 ±0.95b	2.54 ±0.92a
0	100	38.71 ±10.12a	48.67 ±10.22a	55.49 ±11.56a	3.27 ±0.84a b	3.02 ±0.24a b	3.31 ±0.34a
2	0	20.29 ±9.85bc	25.47 ±8.42bc	30.36 ±11.35b c	5.46 ±1.77a	5.62 ±1.92a	4.70 ±2.15a
2	100	26.59 ±5.67ab	32.28 ±6.87b	37.29 ±7.49ab	5.28 ±0.22a	5.20 ±0.45a	3.60 ±0.32a

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].

Cuadro 18. Capacidad antioxidante en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Vaina			Tallo principal			Tallo de macollos		
		15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min
(µg trólox 100 µg de muestra ⁻¹)										
0	0	10.33 ±0.93a	14.08 ^M	15.32 ±1.02a	4.62 ±0.63a	4.40 ±1.35a	4.83 ±1.10a	4.33 ±2.95b	6.09 ±1.04b	5.05 ±1.39b
0	100	7.04 ±1.16b	8.71 ^M	9.99 ±0.86b	4.69 ±1.43a	5.16 ±0.66a	5.11 ±0.56a	11.36 ±3.55ab	11.05 ±3.37ab	11.58 ±4.11ab
2	0	9.56 ±1.17a	12.31 ^M	12.90 ±1.29a	5.07 ±0.53a	4.41 ±0.68a	4.86 ±0.53a	5.51 ±1.76b	5.91 ±2.18b	5.54 ±2.54b
2	100	9.23 ±0.65a	11.06 ^M	12.19 ±0.95a	5.52 ±0.55a	5.42 ±0.44a	5.70 ±0.73a	13.46 ±4.65a	14.87 ±5.09a	15.50 ±5.37a

Si (mM)	NaCl (mM)	Raíz			Hojas		
		15 min	30 min	60 min	15 min	30 min	60 min
(µg trólox 100 µg de muestra ⁻¹)							
0	0	4.09 ±2.40a	3.57 ±2.50a	4.16 ±2.63a	86.37 ^M	87.08 ^M	88.03 ^M
0	100	3.86 ±2.36a	4.15 ±2.43a	3.89 ±2.96a	77.70 ^M	81.63 ^M	86.17 ^M
2	0	7.67 ±1.90a	7.68 ±2.06a	8.07 ±2.69a	86.31 ^M	86.54 ^M	87.33 ^M
2	100	3.76 ±0.72a	3.79 ±0.44a	3.67 ±0.48a	85.13 ^M	87.48 ^M	89.59 ^M

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].^M, mediana de variable no paramétrica.

5.6. Efecto del Si bajo salinidad en la concentración de H₂O₂ de tomate y sorgo

Los efectos principales de los factores de estudio y su interacción, fueron significativos en la concentración de H₂O₂ en hojas, fruto y tallo. En peciolo, solo los efectos principales de ambos factores de estudio fueron significativos y en raíces solo el Si. En hojas, el tratamiento 2 mM Si redujo la concentración de H₂O₂ en 29.79% con respecto al testigo. En fruto, el tratamiento Si+NaCl ocasionó un incrementó en esta variable en 229.7% y en 734.45%; por el contrario, en tallo la decrementó en 5.94% y 32.39% en ambos casos respecto al testigo y al tratamiento 100 mM NaCl, respectivamente (**Cuadro 19**).

En sorgo, el efecto de la interacción de los factores de estudio para la variable concentración de H₂O₂, solo fue significativa en vaina; observándose que el tratamiento 100 mM la incrementó en casi 167%; mientras que, el tratamiento Si+NaCl la redujo en 31.7%, en ambos casos respecto al testigo. El efecto principal de Si solo tuvo influencia en la concentración de H₂O₂ en tallo principal, donde el tratamiento 2 mM la redujo en 22.9% con respecto al testigo. En los tallos de macollo, los efectos principales de Si y NaCl fueron significativos; el tratamiento 2 mM Si incrementa esta variable en 171.6%; de la misma manera, el tratamiento 100 mM NaCl la aumenta en 179.4% (**Cuadro 20**). La variable hojas fue no paramétrica y significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**), se observan las mayores concentraciones con el suministro de NaCl, donde la mayor concentración de H₂O₂ estuvo en el tratamiento 100 mM NaCl que en relación al tratamiento más bajo (testigo) incremento 1902.16%.

Al considerar el suministro de Si en tomate bajo la condición de salinidad sólo aumentó la concentración de H₂O₂ en fruto. Mientras que, en sorgo, con el suministro de Si incrementó en tallo de macollo, independientemente de la condición de salinidad.

Cuadro 19. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de peróxido de hidrógeno en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Pecíolo	Fruto	Tallo	Raíz
		(μmoles H ₂ O ₂ g peso fresco ⁻¹)				
0	0	759.73	308.39	47.23	270.44	60.17
		±14.60a	±10.95a	±5.90b	±7.34b	±7.21a
0	100	245.44	237.41	18.66	376.25	80.26
		±17.93c	±9.82b	±3.04c	±24.33a	±23.75a
2	0	533.39	290.53	41.42	207.94	94.55
		±4.72b	±13.56a	±8.11b	±9.71c	±17.93a
2	100	204.37	198.57	155.71	254.37	86.07
		±10.24d	±6.68c	±9.10a	±8.54b	±17.55a
Efectos principales						
Si (mM)	0	502.58±	272.90	32.94	323.34	70.22
		275.30a	±39.14a	±15.87b	±58.95a	±19.47a
	2	368.88±	244.55	98.57	231.16	90.31
		176.02b	±50.14b	±61.60a	±26.22b	±17.04b
NaCl (mM)	0	646.56	229.46	44.33	239.19	77.36
		±121.40a	±14.87a	±7.26b	±34.34b	±22.31a
	100	224.91	217.99	87.18	315.31	83.16
		±25.70b	±22.16b	±73.52a	±67.29a	±19.58a
Significancia [∧]						
Si		***	***	***	***	*
NaCl		***	***	***	***	NS
Si x NaCl		***	NS	***	**	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
[∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente. ^M, mediana de variable no paramétrica.

Cuadro 20. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de peróxido de hidrógeno en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos	Raíz	Hojas
		(µmoles H ₂ O ₂ g peso fresco ⁻¹)				
0	0	106.86 ±14.76b	54.41 ±17.63a	40.19 ±3.57c	48.12 ±3.95a	53.52 ^M
0	100	285.29 ±42.14a	44.11 ±2.77a	100.98 ±35.11b	64.64 ±10.20a	1071.56 ^M
2	0	61.76 ±8.47c	39.21 ±6.69a	99.50 ±20.89b	52.58 ±11.13a	618.62 ^M
2	100	73.03 ±4.04c	36.76 ±7.90a	283.82 ±25.48a	52.58 ±3.04a	821.56 ^M
Efectos principales						
Si (mM)	0	196.07 ±99.75a	49.26 ±12.91a	70.58 ±39.86b	56.38 ±11.37a	
	2	67.40 ±8.60b	37.99 ±6.90b	191.66 ±100.85a	52.58 ±7.56a	
NaCl (mM)	0	84.31 ±26.55a	46.81 ±14.78a	68.85 ±34.60b	50.35 ±8.09a	
	100	179.16 ±116.79a	40.44 ±6.74a	192.40 ±101.77a	58.61 ±9.49a	
Significancia ^y						
Si		***	*	***	NS	
NaCl		***	NS	***	NS	
Si x NaCl		***	NS	NS	NS	

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente. ^M, mediana de variable no paramétrica.

5.7. Concentración nutrimental

5.7.1. Silicio

Se utilizaron los datos obtenidos de la digestión con ácidos sulfúrico y perclórico y peróxido de hidrógeno, tanto en tomate como en sorgo. Los efectos de la interacción de factores de estudio fueron significativos en raíces de ambas especies, en tallo de tomate y en vaina de sorgo. El efecto principal del factor Si fue significativo en peciolo de tomate y hojas y tallo de macollos en sorgo. Por otra parte, el efecto principal de NaCl fue significativo en hoja y tallo de macollos de sorgo (**Cuadro 21**).

En hojas de tomate, la concentración de Si no fue estadísticamente distinta entre tratamientos (**Figura 14A**). En peciolo (**Figura 14B**) con el tratamiento de 2 mM Si disminuyó 16.67%, mientras que, en tallo (**Figura 14C**) incrementó 32.41% la concentración de Si respecto al testigo.

En la **Figura 14D** destaca el incremento en la concentración de Si en raíces de tomate en ambos tratamientos en el que se adicionó; sin embargo, es evidente que en el tratamiento combinado con 100 mM NaCl la concentración es mayor que cuando se suministra solo; de esta manera el tratamiento Si+NaCl presentó mayor concentración de Si en raíces al testigo en 343.79%.

En hojas de sorgo (**Figura 14E**) la concentración de Si fue mayor en 37.10 y 24.87%, en los tratamientos 2 mM Si y Si+NaCl, con respecto al testigo. Por el contrario, en vaina (**Figura 14F**) se incrementó en 31.82% y se redujo 27.74% en los tratamientos 2 mM Si y Si+NaCl respecto al testigo. Mientras que, en tallo de macollos son mayores sin suministro 2 mM Si y 100 mM NaCl (**Cuadro 21**), teniendo el testigo entre un 10-25% mayor concentración de Si que el resto de tratamientos (**Figura 14G**).

En la **Figura 14H** se observa que la menor concentración de Si en raíces de sorgo se presentó en el tratamiento 100 mM NaCl que se redujo en 24.67 y 12.46% respecto al testigo y al tratamiento Si+NaCl.

Cuadro 21. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Si en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

		Tomate			
		Hoja	Pecíolo	Tallo	Raíz
		(mg kg ⁻¹ peso seco)			
Si (mM)	0	24.87±1.7a	26.39±2.2a	19.43±2.2b	18.37±1.6b
	2	22.91±2.4a	21.99±2.0b	22.84±1.1a	66.91±22.2a
NaCl (mM)	0	23.41±2.5a	23.55±2.9a	20.20±3.0b	33.51±15.4b
	100	24.37±2.0a	24.83±3.2a	22.07±1.2a	51.77±37.6a
Significancia ^y					
	Si	NS	**	***	***
	NaCl	NS	NS	**	***
	Si x NaCl	NS	NS	***	***

		Sorgo			
		Hoja	Vaina	Tallo de macollos	Raíz
		(mg kg ⁻¹ peso seco)			
Si (mM)	0	24.43±2.1b	36.42±2.7a	26.29±2.2a	25.47±4.0a
	2	34.46±3.1a	35.2±11.4a	23.17±2.7b	27.15±2.9a
NaCl (mM)	0	31.19±5.3a	39.99±6.7a	26.79±1.8a	27.03±2.5a
	100	27.70±6.0b	31.63±7.3b	22.67±2.2b	25.59±4.3a
Significancia ^y					
	Si	***	NS	***	NS
	NaCl	**	***	***	NS
	Si x NaCl	NS	***	NS	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

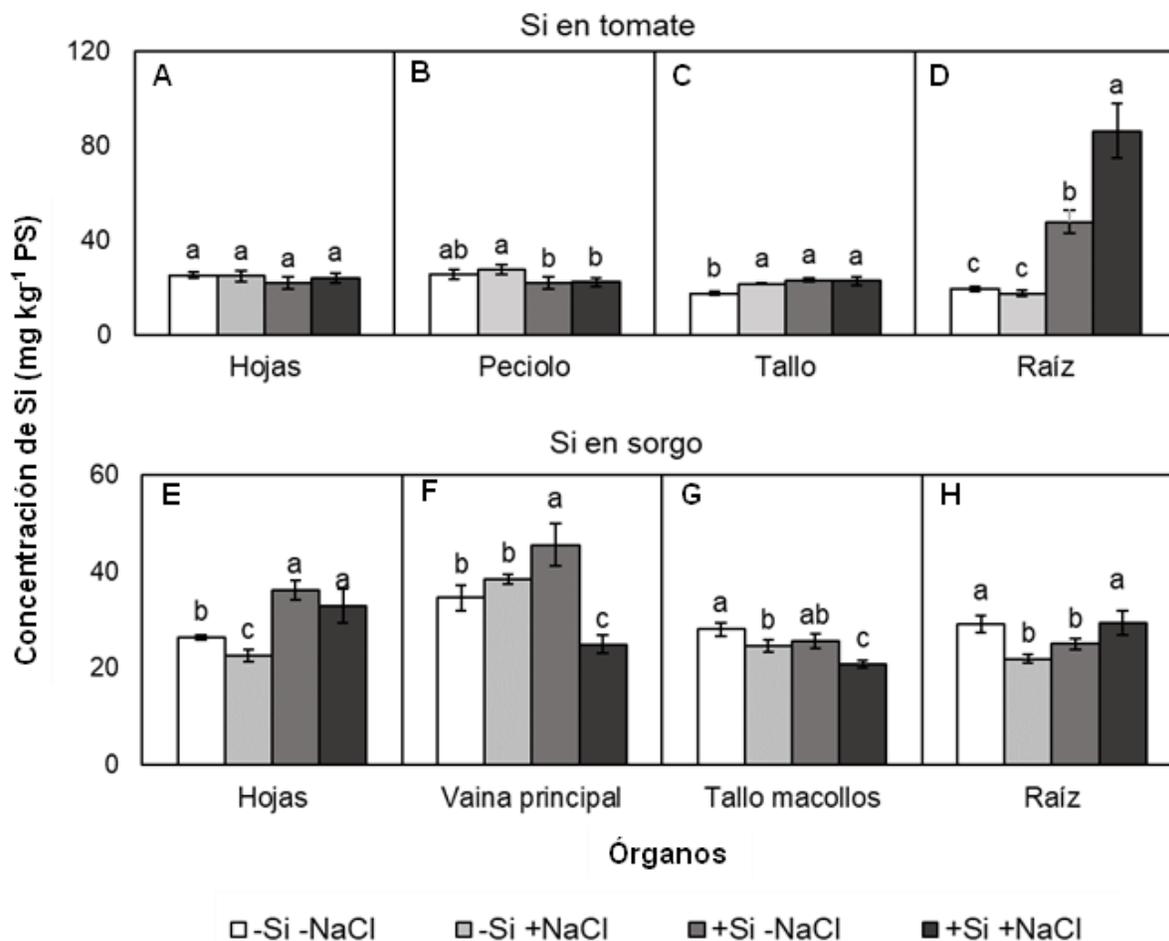


Figura 14. Concentración Si por órganos en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. Las barras de error representan \pm Desviación estándar. Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM. PS: Peso seco.

Las concentraciones de Si en frutos de tomate y en tallo principal de sorgo fueron variables no paramétricas y significativas en la prueba Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). En frutos de tomate, el tratamiento Si+NaCl incrementó la concentración de Si en 45.5%, respecto al testigo y en 63.3% respecto al tratamiento 100 mM NaCl (**Figura 15A**). En tallo principal de sorgo, la adición de 100 mM NaCl, independientemente a la presencia de Si, ocasionó la menor concentración de Si (**Figura 15B**).

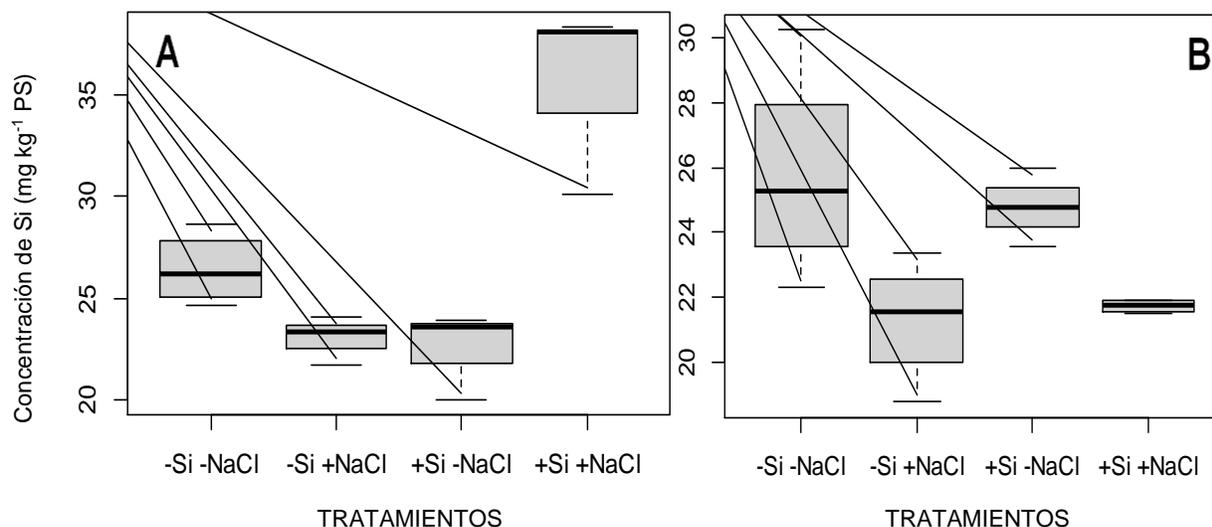


Figura 15. Concentración de Si en fruto de tomate (A) y en tallo principal en sorgo (B). Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM. PS: Peso seco.

En tomate, los patrones de concentración muestran que, de raíz a la parte aérea (de tallo a peciolo y a hojas), la significancia con el suministro de Si se modificó; es decir, que mientras en raíz fue significativa y marcada la diferencia de la concentración de Si entre presencia y ausencia de Si, en tallo fue solo respecto al testigo; por el contrario, en peciolos no tan marcada dicha tendencia; mientras que, en hojas, no hubo diferencias significativas.

Ahora bien, en fruto, también fue marcada y significativa la diferencia, pero sólo cuando hubo aplicaciones conjuntas de Si y NaCl; además, es de considerarse que el primer racimo se encuentra en la parte basal de la planta. Esto podría asociarse a que, al considerarse el tomate como una planta no acumuladora de silicio, se han encontrado canales de influjo de Si (Lsi1) en raíces, pero no se han detectado transportadores (Lsi2) para la translocación de Si en parte aérea (Coskun *et al.*, 2019). Por lo que, al incrementar la altura de la planta, la distribución y alcance de silicio disminuye.

En sorgo, aún en la parte aérea y más alta de la planta la distribución de silicio es notoria entre tratamientos con un suministro de Si, contrario a lo que ocurre en tomate. Lo cual se asocia a que, el sorgo cuenta con los transportadores de translocación de silicio en parte aérea (Deshmukh *et al.*, 2015). Además, es de destacarse que en el caso de la

vaina principal, fue mayor la concentración de Si solo con la aplicación de Si, pero cuando se aplicó en conjunto con 100 mM NaCl, la concentración fue la menor de todos los tratamientos; mientras que, en hojas en ambos tratamientos fueron las concentraciones más elevadas. Ello muestra una acumulación diferente de Si en hojas y vaina cuando la planta es sometida a condiciones de salinidad. En otras investigaciones se ha reportado que, bajo condiciones de estrés, las hojas y raíces funcionan como órganos acumuladores de silicio amorfo (Katz *et al.*, 2021; Lux *et al.*, 2020).

5.7.2. Sodio

En el **Cuadro 22**, se observa que, la interacción de los factores de estudio fue significativa en la concentración de Na en todos los órganos evaluados de tomate y sorgo.

En la **Figura 16** se observa que en todos los órganos evaluados de tomate y de sorgo, se presentan las mayores concentraciones de Na en los tratamientos con NaCl. Sin embargo, en peciolo, fruto y raíz de tomate esto ocurre en mayor magnitud en ausencia de Si; es decir, en tomate, en el tratamiento 100 mM NaCl con 2 mM Si, la concentración de Na es menor en 89.1, 77.5 y 93.1% en peciolo, fruto y raíz de tomate (**Figuras 16A, 16B y 16D**), que en el tratamiento con solo 100 mM NaCl. Por el contrario, en sorgo, las concentraciones de Na fueron mayores en general en tratamientos con 2 mM Si; con excepción de hojas (**Figura 16E**), donde la concentración de Na es menor en 74.3% en el tratamiento 2 mM Si +100 mM NaCl, con respecto al tratamiento con solo 100 mM NaCl. En la vaina (**Figura 16F**) y en el tallo principal de sorgo (**Figura 16G**) se observa que el tratamiento 2 mM Si +100 mM NaCl incrementa la concentración de Na en 13.9 y 24.1%, en comparación con el tratamiento 100 mM NaCl.

En tallo de tomate (**Figura 16C**) y en raíz de sorgo (**Figura 16H**) no existieron diferencias estadísticas en la concentración de Na en ambos tratamientos con suministro de 100 mM NaCl.

Cuadro 22. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Na en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

		Tomate			
		Pecíolo	Fruto	Tallo	Raíz
		(mg kg⁻¹ peso seco)			
Si (mM)	0	16512.8±	1815.7±	7679.5±	13176.8±
		16032.4b	1537a	6905.8b	11243.3a
	2	15568.4±	21.99±	8397.9±	13195±
		13373.7a	2.0b	6388.6a	9500.8a
NaCl (mM)	0	2290.8±	688.4±	1822.5±	3487.2±
		825.8b	63.5b	642b	893.5b
	100	29790.4±	2664.2±	14254.9±	884.5±
		1896.3a	367.5a	257.4a	936.6a
Significancia^y					
Si		***	**	***	NS
NaCl		***	***	***	***
Si x NaCl		***	***	***	***

		Sorgo			
		Hoja	Vaina	Tallo principal.	Raíz
		(mg kg⁻¹ peso seco)			
Si (mM)	0	2462.4±	2690.2±	6771.5±	8074.5±
		2078a	2361.6a	6661.3b	6966.4b
	2	1891.3±	3058.1±	8935±	8542.8±
		1477.7b	2814.3a	8772.5a	6337.8a

Sorgo					
		Hoja	Vaina	Tallo principal.	Raíz
		(mg kg⁻¹ peso seco)			
NaCl (mM)	0	515.5±	454.6±	634.8±1	2089.2±
		22.5b	39b	01.1b	564.6b
	100	3838.1±	5293.7±	15071.7±	14528.1±
		616a	438.9a	2212.9a	302.6a
Significancia^y					
	Si	***	NS	***	***
	NaCl	***	***	***	***
	Si x NaCl	***	***	*	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

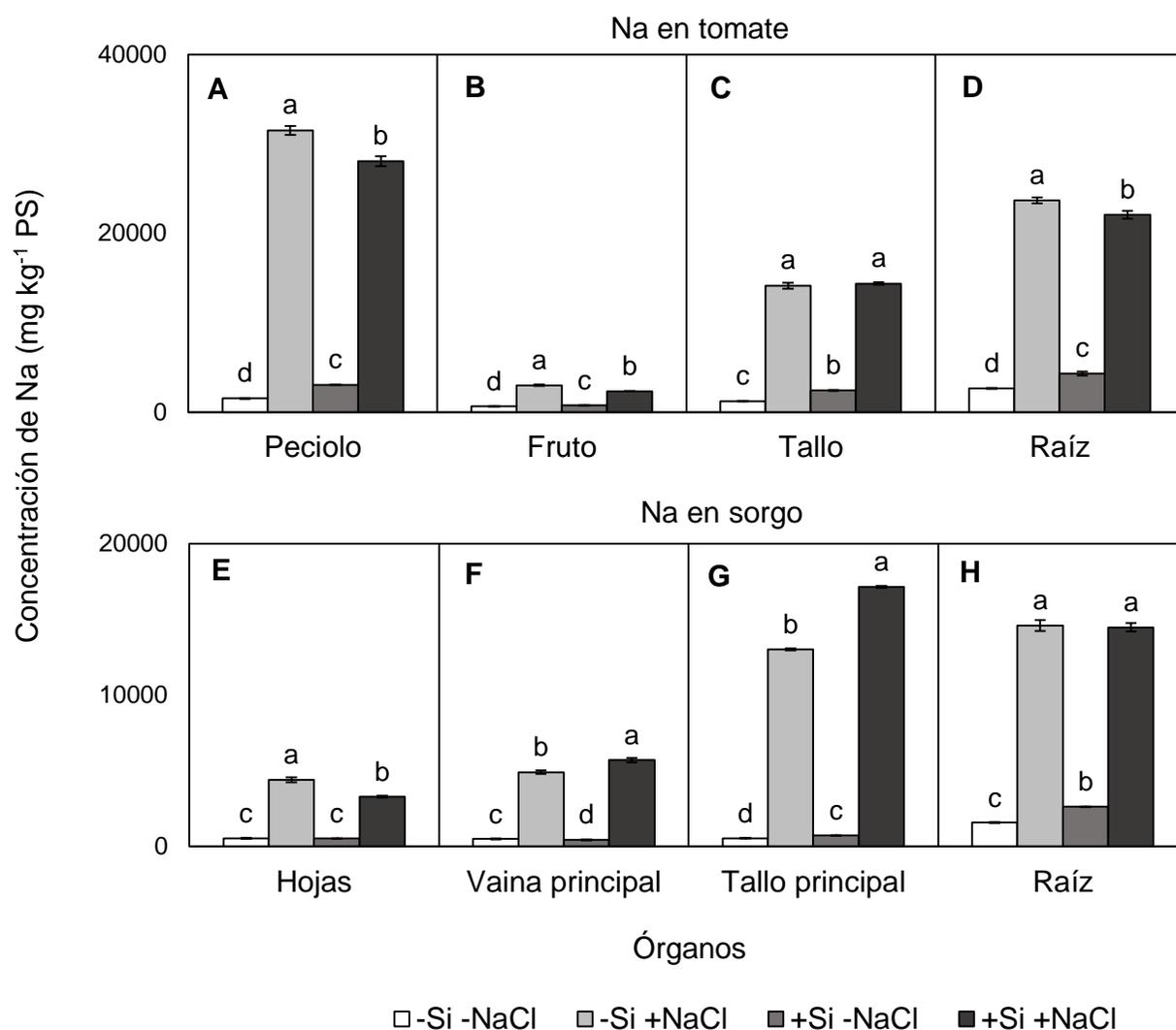


Figura 16. Concentración Na por órganos en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. Las barras de error representan \pm Desviación estándar. -Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM.

En la **Figura 17** se presentan las concentraciones de Si en hojas de tomate y en tallos de macollos de sorgo. La variable hojas en tomate y tallo macollos en sorgo fueron variables no paramétricas y significativas en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). En la **Figura 17A**, se observa la mayor concentración de Si en hojas de tomate de plantas tratadas con 100 mM NaCl, concentración 28 veces mayor que el testigo, donde se obtuvo la menor concentración.

En tallos de macollos de sorgo (**Figura 17B**), se observa que en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl, la concentración de Si fue superior 23 veces a la del tratamiento 2 mM Si.

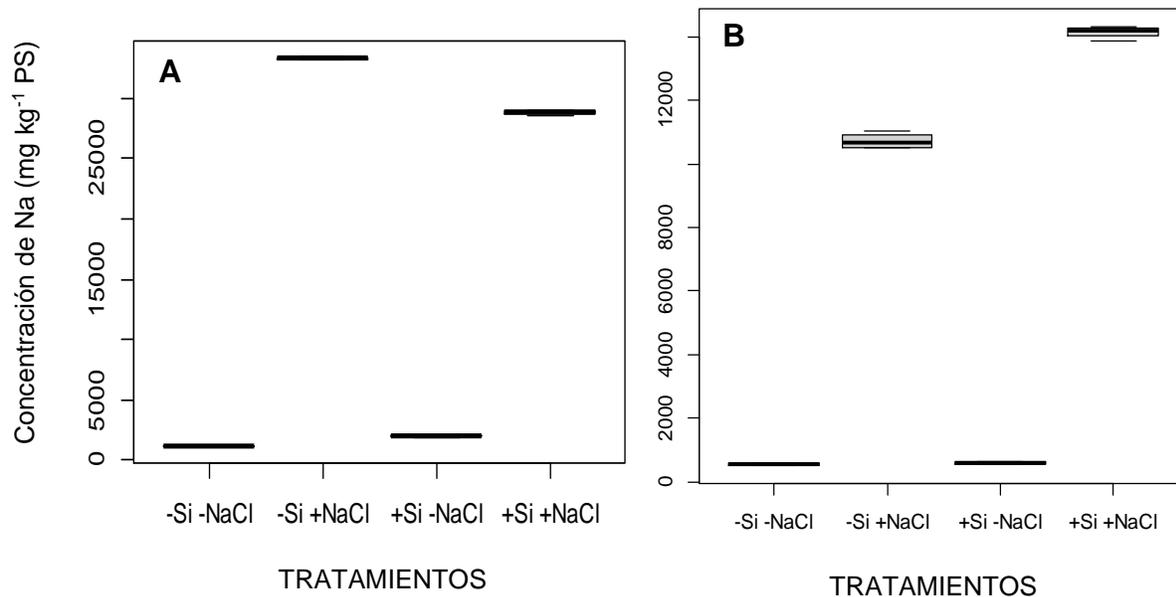


Figura 17. Gráficas de caja de la concentración de Si. Hojas de tomate (A). Tallo macollos en sorgo (B). -Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM

Los resultados obtenidos en hojas de ambas especies, son acordes a lo reportado por Coskun *et al.*, 2019, donde se menciona que en presencia de Si ante una condición de estrés, la formación de una barrera de sílice amorfo en la endodermis de la raíz refuerza a la banda de Caspary e impide la entrada de iones como Na⁺ a la planta. Sin embargo, es de notarse que, en sintonía con esta teoría, el tomate no presenta proteínas Lsi1 en comparación al sorgo (Deshmukh *et al.*, 2015; Coskun *et al.*, 2019); pero de igual forma fueron resultados con el mismo efecto. Lo cual puede deberse a que, la eficiencia en la actividad de Lsi1 y Lsi2, aún en tomate, ha reportado mejoras ante condiciones de estrés (Hoffmann *et al.*, 2020; Trejo-Téllez *et al.*, 2020). Además, las distintas respuestas a las condiciones de salinidad (Shabala, 2012), así como, los diferentes tipos de canales y transportadores de sodio entre ambas especies (Amtmann & Beilby, 2010) pueden estar involucrados.

5.7.3. Cloruro

En ambos cultivos, las interacciones de los factores de estudio no presentaron diferencias con significancia estadística, excepto en fruto de tomate. Por otra parte, el efecto principal de Si solo fue significativo en esta variable en tallo de macollo de sorgo; donde el tratamiento 2 mM Si propició el incremento en la concentración de cloruro. Asimismo, en hoja y tallo de tomate, así como en raíz de sorgo, el factor NaCl tuvo influencias significativas en la concentración de cloruro (**Cuadro 23**).

En hojas y tallos de tomate (**Figuras 18A y 18D**), si bien no se presentaron diferencias entre tratamientos en la concentración de cloruro, los tratamientos con 100 mM NaCl presentan valores superiores entre 20 y 40% en esta variable al resto de los tratamientos. Asimismo, en raíces de sorgo (**Figura 18H**), la concentración de cloruro en los tratamientos con 100 mM NaCl es superior entre 40 y 50% a la registrada en los tratamientos sin NaCl; sin embargo, esta diferencia no es significativa. En tallos de macollos de sorgo, se registraron las mayores concentraciones de cloruro en los tratamientos con 2 mM Si, independientemente de la presencia de NaCl (**Figura 18G**).

En tomate, a diferencia de lo obtenido en los resultados de la concentración de Na, el suministro de 2 mM Si bajo una condición salina no redujo la concentración de Cl⁻, pero tampoco afectó la aplicación de Si por sí sola. Mientras que, en sorgo, a nivel de raíz el tratamiento 2 mM Si + 100 mM disminuyó la concentración de Cl⁻, lo cual coincide con lo reportado por Javaid et al. (2019); pero contrario a lo observado en tallo de macollos, donde, la aplicación de 2 mM Si independientemente de la condición de salinidad incrementó considerablemente la concentración de Cl⁻. Es de mencionarse que, los macollos derivan de yemas laterales inferiores, y que la maduración de sus espigas es más tardía que la del tallo principal (Buenavista, 2003), lo cual estaría indicando diferencias en la fisiología de ambas estructuras, y posibles diferencias en la distribución de iones y compuestos, habiendo hacia las yemas terminales del tallo principal más selectividad y demanda por ser punto de crecimiento principal (Crang *et al.*, 2018).

Cuadro 23. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de cloruro en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

		Tomate				
		Hoja	Pecíolo	Fruto	Tallo	Raíz
		(mg kg⁻¹ peso seco)				
Si (mM)	0	8.18±2.2a	10.2±4.7a	6.97±0.6a	7.29±1.6a	9.65±5.1a
	2	8.86±2.4a	7.94±2.7a	5.84±1.1a	7.39±1.8a	12.9±9.0a
NaCl (mM)	0	7.26±1.5b	7.28±1.3a	6.39±1.0a	6.42±1.1b	8.07±3.0a
	100	9.77±2.3a	10.9±4.8a	7.0±0.64a	8.26±1.6a	14.5±8.97a
Significancia [∧]						
	Si	NS	NS	NS	NS	NS
	NaCl	*	NS	NS	*	NS
	Si x NaCl	NS	NS	NS	NS	NS

		Sorgo		
		Hoja	Tallo de macollos.	Raíz
		(mg kg⁻¹ peso seco)		
Si (mM)	0	6.92±2.41a	4.79±1.24b	10.47±3.06a
	2	7.75±1.75a	8.86±3.04a	10.03±3.44a
NaCl (mM)	0	6.83±2.08a	6.56±2.99a	8.15±2.37b
	100	7.84±2.09a	7.08±3.33a	12.35±2.37a
Significancia [∧]				
	Si	NS	**	NS
	NaCl	NS	NS	**
	Si x NaCl	NS	NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
[∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

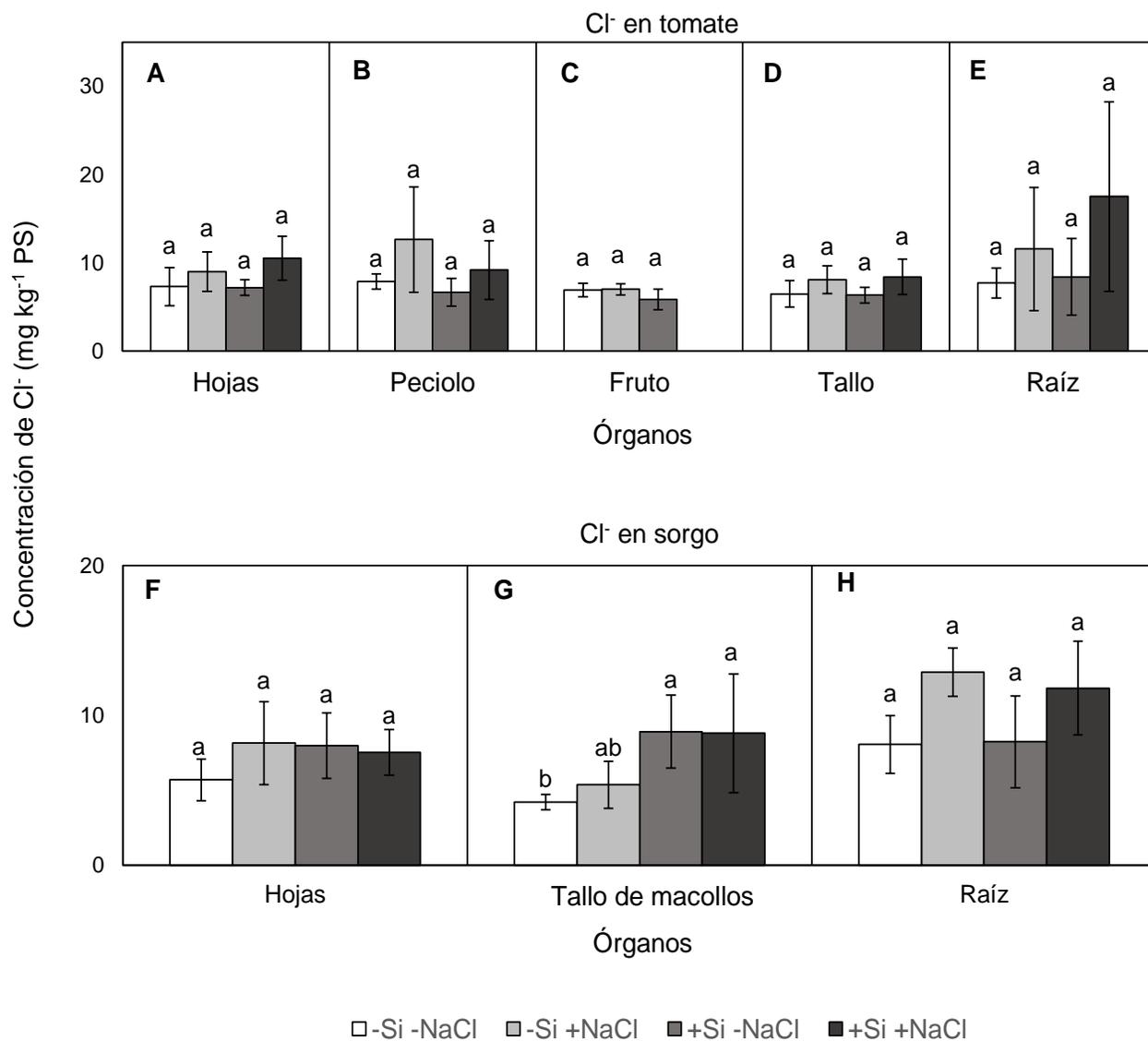


Figura 18. Concentración Cl⁻ por órganos en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. Las barras de error representan \pm Desviación. -Si: 0 mM; -NaCl: 0 mM; +Si: 2 mM; +NaCl: 100 mM. PS: Peso seco.

5.7.4. Macronutrientes

Los tratamientos (interacción de factores de estudio) tuvieron efecto significativo en la concentración de N en fruto y tallo de tomate; así como en hoja y tallo de macollo de sorgo (**Cuadro 24**). En fruto y tallo de tomate la mayor concentración de N se tuvo en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl, seguido del tratamiento 2 mM Si en fruto; con valores medios superiores en 27.7% a los del tratamiento sin Si y sin NaCl. En hojas de sorgo, el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl ocasionó reducción significativa en la concentración de N. En tallos de macollo, la menor concentración de N se tuvo en el tratamiento sin Si y sin NaCl.

Por otra parte, el factor Si tuvo efectos significativos en la concentración de N en peciolo de tomate; observándose que su presencia incrementa dicha variable en 13.1%. Asimismo, en sorgo, el tratamiento 2 mM Si tuvo influencia negativa en la concentración de N en hoja y vaina (decrementos de 11.7 y 8.6%, respectivamente); mientras que fue positiva en raíz (aumento de 16.1%); en todos los casos respecto al tratamiento sin Si (**Cuadro 24**).

En lo que respecta a los efectos significativos de NaCl en la concentración de N, éstos se registraron en la raíz de tomate y en vaina de sorgo. En raíces de tomate, el tratamiento con 100 mM NaCl ocasionó decrementos en la concentración de N de 9.6%. En vainas de sorgo, se registró un aumento en la concentración de N de 6.2% con el tratamiento 100 mM NaCl (**Cuadro 24**).

Es pertinente indicar que las concentraciones de N en hojas de tomate y en tallo principal de sorgo, son no paramétricas y significativas en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). En el **Cuadro 25**, se observa que la mayor concentración foliar de N en tomate se tuvo en el tratamiento 2 mM Si, superando en 34.9% al tratamiento sin Si y sin NaCl. Por otra parte, en tallo principal de sorgo, la mayor concentración de N se tuvo en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl, superando en 74.6% al testigo.

Cuadro 24. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de N en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Tomate				Sorgo			
		Pecíolo	Fruto	Tallo	Raíz	Hoja	Vaina	Tallo de macollos	Raíz
		(g kg ⁻¹ peso seco)							
0	0	19.6±0.4b	24.2±0.8 d	23.9±1.1a	43±2.8a	33.0±1a	12.5±0.8 a	13.8±0.3c	21.7±1. 5b
0	100	19.0±0.7b	28.5±0.7 b	23.0±0.7ab	38.9±1.5 b	32±0.6a	12.5±0.5 a	21±0.8a	22.9±0. 8b
2	0	21.7±0.3a	30.8±0.6 a	21.87±0.1b	44±1.6a	31.8±1. 3a	10.7±0.7 b	16.2±1.2 b	25.9±0. 6a
2	100	21±0.9a	31±0.3a	24.3±0.9a	40±0.8ab	24±0.7b	12±0.3a	16±0.8b	25±0.7a
Efectos principales									
Si (mM)	0	19.33±0.6 b	26.38±2. 4b	23.49±1.0a	41.25±3.2 a	32.15±1 .2a	12.54±0. 6a	17.41±3.8 a	22.31±1 .3b
	2	21.83±0.6 a	30.76±0. 5a	23.10±1.4a	42.43±2.3 a	28.39±3 .8b	11.46±0. 9b	16.32±0.9 b	25.9±0. 6a
NaCl (mM)	0	20.69±1.2 a	27.52±3. 5b	22.92±1.3a	43.96±2.2 a	32.46±1 .3a	11.64±1. 1b	15.05±1.5 b	23.80±2 .4a
	100	20.47±1.6 a	29.62±1. 3a	23.66±1.0a	39.72±1.4 b	28.08±3 .4b	12.36±0. 4a	18.68±2.5 a	24.41±1 .7a

Significancia^y

Si	***	***	NS	NS	***	*	*	***
NaCl	NS	***	NS	***	***	**	***	NS
Si x NaCl	NS	***	**	NS	***	NS	***	NS

Medias \pm Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 25. Medianas de variables macronutrimientales no paramétricas en tomate cv. El Cid y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Tomate				Sorgo			
		N	P		K	N	K	Ca	Mg
		Hojas	Pecíolo	Raíz	Vaina	Tallo principal	Raíz		
(g kg ⁻¹ peso seco)									
0	0	33.55	2.72	8.74	12.42	10.45	11.36	2.14	1.75
0	100	39.02	2.39	8.73	13.84	14.30	12.70	1.92	1.89
2	0	45.25	3.31	8.38	13.69	8.40	15.69	1.94	1.78
2	100	41.65	2.82	10.16	13.81	14.67	18.49	2.14	1.68

En el **Cuadro 26** se presentan los resultados de concentración de P obtenidos en los órganos de ambas especies. Destaca el efecto significativo de la interacción de los factores de estudio en hojas, fruto y tallo de tomate, así como en el tallo principal, tallo de macollo y raíz de sorgo. En tomate se observa el efecto positivo del tratamiento 2 mM Si, con incrementos significativos respecto al testigo, de magnitud 27.5, 5.2 y 14.6% en hojas, fruto y tallo, respectivamente.

En sorgo, por el contrario, el tratamiento 2 mM Si redujo de manera significativa la concentración de P en los tallos principal y de macollos, con decrementos significativos de 10.3 y 6.1%, con respecto al tratamiento testigo. Los efectos principales de Si y NaCl fueron significativos en la concentración de P en hojas de sorgo, la adición de 2 mM Si redujo en 3.5 y 24.1% respectivamente, esta variable (**Cuadro 26**).

En vaina y raíz de sorgo, el efecto principal de NaCl fue significativo en la concentración de P; la adición de 100 mM NaCl redujo en vaina la concentración de P en 11.7%; por el contrario, la incrementa en 5.9% en raíz (**Cuadro 26**).

Cuadro 26. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de P en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Tomate			Sorgo				
		Hojas	Fruto	Tallo	Hojas	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos	Raíz
		(g kg ⁻¹ peso seco)							
0	0	2.22±0.0 3c	3.88±0.0 5b	3.36±0.0 5b	3.06±0.0 7a	1.73±0. 04a	1.65±0.01 c	2.63±0.0 7a	3.3±0.03c
0	100	2.48±0.0 9b	3.57±0.0 6c	2.97±0.0 2d	2.29±0.1c	1.58±0. 06b	2.31±0.03 a	2.61±0.0 4a	3.8±0.008 a
2	0	2.83±0.0 4a	4.08±0.0 7a	3.85±0.0 4a	2.86±0.0 4b	1.7±0.0 3a	1.48±0.01 d	2.47±0.0 2b	3.53±0.01 b
2	100	2.76±0.0 2b	3.54±0.0 4c	3.22±0.0 3c	2.16±0.0 6c	1.58±0. 01b	2.21±0.01 b	2.6±0.04 a	3.53±0.01 b
Efectos principales									
Si (mM)	0	2.3±0.1b	3.7±0.1a	3.1±0.2 b	2.6±0.4a	1.6±0.1 a	1.9±0.3a	2.6±0.1a	3.5±0.2a
	2	2.8±0.04 a	3.81±0.2 b	3.53±0. 3a	2.51±0.3 b	1.64±0. 06a	1.85±0.3 b	2.53±0.0 7b	3.53±0.01 a

Efectos principales									
NaCl (mM)	0	2.5±0.3b	3.9±0.1b	3.6±0.2 a	2.9±0.1a	1.7±0.0 4a	1.5±0.09 b	2.5±0.1a	3.4±0.1b
	100	2.6±0.1a	3.5±0.05 a	3.0±0.1 b	2.2±0.1b	1.5±0.0 4b	2.2±0.05 a	2.6±0.04 a	3.6±0.1a
Significancia[∧]									
	Si	***	*	***	***	NS	***	**	NS
	NaCl	**	***	***	***	***	***	NS	***
	Si x NaCl	***	**	***	NS	NS	**	*	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. [∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Las variables concentración de P en peciolo y raíz en tomate, fueron no paramétricas y significativas en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). En el **Cuadro 25**, se observa que la mayor concentración P en peciolo de tomate se tuvo en el tratamiento 2 mM Si, siendo mayor en 21.7% al testigo. para peciolo. En raíz de tomate, el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl, incrementó la concentración de P en 16.24%, respecto al testigo.

En hojas, peciolo y raíz de tomate, la interacción de los factores de estudio fue significativa para la concentración de K. El tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl redujo en 13.3, 16.4 y 34.6% la concentración de K en hojas, peciolo y raíz, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin Si y sin NaCl. Por otro lado, en sorgo, en hojas de sorgo, el tratamiento 2 mM Si redujo la concentración de K en casi 36% respecto al testigo; mientras que el tratamiento 100 mM NaCl redujo la de tallo principal en 21.4%, también respecto al testigo (**Cuadro 27**).

El efecto principal de Si fue significativo en la concentración de K en fruto de tomate y en tallo de macollo de sorgo; el tratamiento 2 mM Si la aumentó en 33.4% y la redujo en 12.8%, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin Si (**Cuadro 27**).

Por otra parte, la concentración de K en tallo de tomate y en tallo de macollo de sorgo, se incrementó significativamente con la adición de 100 mM NaCl, con aumentos de 8.9 y 11.4%, con respecto al tratamiento sin NaCl (**Cuadro 27**). Cabe mencionar que, las variables concentración de K en vaina y raíz de sorgo fueron no paramétricas y significativas en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**).

En el **Cuadro 25**, se muestra que, la mayor concentración de K se tuvo en el tratamiento 100 mM NaCl, 11.14% mayor respecto al testigo. Mientras que, en raíz la mayor concentración de K estuvo en el tratamiento Si+NaCl, aumentando en 62.76%, en comparación con el tratamiento sin Si y sin NaCl.

Cuadro 27. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de K en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Tomate					Sorgo		
		Hojas	Peciolo	Fruto	Tallo	Raíz	Hojas	Tallo principal	Tallo de macollos
(g kg ⁻¹ peso seco)									
0	0	13.73±0. 4a	14.95±0. 4b	12.79±0.5 b	14.70±0. 2b	16.67±1. 1a	20.30± 0.2a	15.90±0.1 a	14.60±0.3a b
0	100	13.17±0. 6a	18.77±0. 1a	12.82±1.0 b	15.40±0. 4ab	17.67±0. 1a	18.60± 1.1b	12.50±0.09 d	15.50±0.8a
2	0	11.00±0. 3b	18.00±0. 7a	16.40±0.5 a	14.90±1. 0b	15.00±0. 6b	13.00± 0.2d	15.40±0.3b	12.00±0.4c
2	100	11.90±0. 1b	12.50±0. 2c	17.74±0.6 a	16.60±0. 5a	10.90±0. 6c	17.00± 0.9c	14.80±0.2c	14.20±0.6b
Efectos principales									
Si (mM)	0	13.45±0. 6a	16.86±2. 0a	12.80±0.7 b	15.14±0. 4a	17.17±0. 9a	19.5±1 .1a	14.2±1.8b	15.08±0.7
	2	11.69±0. 3b	15.33±3. 0b	17.08±0.9 a	15.83±1. 2a	13.02±2. 2b	14.7±2 .4b	15.1±0.4a	13.15±1.2
NaCl (mM)	0	12.58±1. 2a	16.56±1. 8a	14.61±2.0 a	14.88±0. 7b	15.87±1. 2a	16.4±4 .1b	15.7±0.3a	13.36±1.4

		(g kg⁻¹ peso seco)							
NaCl	100	12.55±0.8a	15.63±3.3b	15.28±2.7a	16.09±0.8a	14.33±3.5a	17.8±1.3a	13.6±1.2b	14.88±0.9
(mM)									
Significancia ^y									
	Si	***	***	***	NS	***	***	***	***
	NaCl	NS	**	NS	**	**	**	***	***
	Si x NaCl	*	***	NS	NS	***	***	***	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

En tomate, la interacción de los factores de estudio fue significativa para la concentración de Ca en todos los órganos, excepto la raíz. En hojas, peciolo y fruto, las medias más bajas se tuvieron en el tratamiento 100 mM NaCl, y las más altas en el tratamiento sin Si y sin NaCl (testigo) en hojas y peciolo, siendo superior el testigo en 13.9 y 15.5%, respectivamente (**Cuadro 28**).

Mientras que, en fruto, la mayor concentración de Ca se tuvo en el tratamiento Si+NaCl, incrementando 65.4% respecto al testigo. En tallo, la concentración de Ca fue reducida de manera significativa en ambos tratamientos con 100 mM NaCl (**Cuadro 28**).

En sorgo, la interacción de los factores de estudio fue significativa para la concentración de Ca en todos los órganos, observándose reducciones en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl de 33.4, 45.8, 54.1 y 49% en hojas, vaina, tallo principal y tallo de macollo, respectivamente en comparación con el tratamiento sin Si y sin NaCl (**Cuadro 29**).

La variable concentración de Ca en raíz de sorgo fue no paramétrica y significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). En el **Cuadro 25**, se observa la mayor concentración de Ca en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl y en el testigo.

La concentración de Mg en hojas, frutos y raíz de tomate fue influenciada por la interacción de los factores de estudio, observándose que en el tratamiento sin Si y sin NaCl la media fue menor en casi 9% al resto de los tratamientos; mientras que, en raíz, se tuvieron altas concentraciones de Mg en los tratamientos con 100 mM NaCl. En frutos, la menor concentración de Mg se registró en el tratamiento 100 mM NaCl (**Cuadro 30**).

En peciolo y tallo, las concentraciones de Mg fueron influenciadas por los factores de estudio en lo individual. Por un lado, la aplicación de Si decrece la concentración de Mg en peciolo en 5.7% y aumentó la del tallo en 5.4%. Se observó también en peciolo y tallo que la concentración de Mg decrece en 29 y 29.6%, respectivamente, en plantas tratadas con NaCl (**Cuadro 30**).

Cuadro 28. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Ca en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Pecíolo	Fruto	Tallo	Raíz
		(g kg ⁻¹ peso seco)				
0	0	19.33±0.1a	12.32±0.1a	1.30±0.01b	5.8±0.04a	6.75±0.1a
0	100	16.64±0.1d	10.41±0.2c	1.19±0.009d	4.81±0.01b	5.37±0.02b
2	0	18.78±0.3b	11.55±0.4b	1.26±0.01c	5.95±0.06a	5.42±0.1b
2	100	17.80±0.1c	10.59±0.3c	2.15±0.01a	4.76±0.03b	4.21±0.06c
Efectos principales						
Si (mM)	0	18±1.1b	11±1.0a	1.2±0.05b	5.30±0.5a	6.0±0.7a
	2	18±0.5a	11±0.6a	1.71±0.4a	5.35±0.6a	4.8±0.6b
NaCl (mM)	0	19±0.3a	12±0.5a	1.3±0.02b	5.9±0.09a	6±0.7a
	100	17±0.6b	11±0.2b	1.67±0.5a	4.78±0.1b	4.7±0.6b
Significancia [∧]						
Si		*	NS	***	NS	***
NaCl		***	***	***	***	***
Si x NaCl		***	**	***	*	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
[∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

En vainas de sorgo, la interacción de los factores de estudio fue significativa para la concentración de Mg, observándose la media más alta en el tratamiento sin Si y sin NaCl, que fue mayor en 22.2% a la registrada en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl. Por otro lado, la adición de Si redujo las concentraciones de Mg en hoja, tallo principal y tallo de macollo en 12.3, 13.2 y 12.3%, respectivamente. De la misma manera, el tratamiento con NaCl redujo la concentración de Mg en estos órganos en 9.5, 29.1 y 14.5%, respectivamente (**Cuadro 31**).

Asimismo, se indica que la concentración de Mg en raíz de sorgo fue una variable no paramétrica significativa y que tuvo la media más alta en el tratamiento 2 mM + 100 mM NaCl (**Cuadro 25**).

La interacción de los factores de estudio tuvo efecto significativo en las concentraciones de S en hojas, peciolo, fruto y tallo; en éstos, el tratamiento 2 mM Si ocasionó incrementos en esta variable del orden de 21.1, 13.7, 1.5 y 18.2% respectivamente, en comparación con el tratamiento sin Si y sin NaCl, En raíces, los efectos principales de Si y NaCl fueron significativos, la adición tanto de Si como de NaCl incrementó significadamente la concentración de S en casi 4 y 2.6%, respectivamente (**Cuadro 32**).

En hojas de sorgo, los efectos principales de los factores de estudio fueron significativos en la concentración de S. La adición de Si la redujo en 4.1%; mientras que la de NaCl causó decrementos del orden de 28.9% (**Cuadro 33**).

En el resto de los órganos, se observó efecto negativo del tratamiento 100 mM NaCl en la concentración de S, dado que la redujo en 29.9% en vaina, en 14.7% en tallo principal, en 34.7% en tallo de macollo y en 28% en raíz, en comparación con el tratamiento sin Si y sin NaCl (**Cuadro 33**).

De los macronutrientes evaluados se observa que, tanto con y sin la condición de salinidad, la aplicación de Si en tomate incrementó la concentración de N y S en hojas y peciolo, de N y K en fruto y P, Mg y S en tallo. Mientras que, en sorgo, incrementó N, K y S sólo en raíz. Considerando únicamente a los elementos que incrementaron sólo bajo

la condición de salinidad se tuvo al P en raíz, Ca en hojas y, Ca y S en fruto. Por su parte en sorgo, fue K en tallo principal, Ca en raíz y S en vaina y tallo principal.

Cuadro 29. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Ca en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos
		(g kg ⁻¹ peso seco)			
0	0	3.77±0.02a	2.49±0.01a	1.81±0.04a	2.10±0.05a
0	100	2.60±0.01c	1.29±0.05c	0.86±0.01c	1.20±0.01c
2	0	3.11±0.04b	1.89±0.02b	1.23±0.02b	1.47±0.03b
2	100	2.51±0.01d	1.35±0.01c	0.83±0.02c	1.07±0.02d
Efectos principales					
Si (mM)	0	3.19±0.6a	1.89±0.6a	1.33±0.5a	1.65±0.4a
	2	2.81±0.3b	1.62±0.2b	1.03±0.2b	1.27±0.2b
NaCl (mM)	0	3.44±0.3a	2.19±0.3a	1.52±0.3a	1.79±0.3a
	100	2.55±0.05b	1.32±0.04b	0.84±0.02b	1.14±0.07b
Significancia [∧]					
Si		***	***	***	***
NaCl		***	***	***	***
Si x NaCl		***	***	***	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
[∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 30. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Mg en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Pecíolo	Fruto	Tallo	Raíz
(g kg ⁻¹ peso seco)						
0	0	4.15±0.03c	5.52±0.1a	1.43±0.05a	2.20±0.05b	4.59±0.03b
0	100	4.53±0.02a	3.94±0.09c	1.24±0.06b	1.52±0.02d	5.09±0.1a
2	0	4.38±0.04b	5.23±0.05b	1.41±0.04a	2.31±0.05a	4.42±0.12b
2	100	4.53±0.02a	3.69±0.04d	1.34±0.04ab	1.65±0.02c	5.17±0.09a
Efectos principales						
Si (mM)	0	4.34±0.2b	4.73±0.8a	1.33±0.1a	1.86±0.3b	4.84±0.2a
	2	4.4±0.08a	4.46±0.8b	1.3±0.05a	1.98±0.3a	4.80±0.4a
NaCl (mM)	0	4.27±0.1b	5.37±0.1a	1.4±0.04a	2.26±0.07a	4.50±0.1b
	100	4.5±0.02a	3.81±0.1b	1.2±0.07b	1.59±0.07b	5.1±0.09a
Significancia ^y						
Si		***	***	NS	***	NS
NaCl		***	***	***	***	***
Si x NaCl		***	NS	*	NS	*

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. ^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 31. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Mg en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos
		(g kg ⁻¹ peso seco)			
0	0	1.81±0.06a	1.62±0.04a	1.50±0.06a	1.75±0.05a
0	100	1.61±0.06b	1.39±0.02b	1.08±0.02c	1.51±0.01b
2	0	1.55±0.03b	1.34±0.03b	1.33±0.02b	1.55±0.03b
2	100	1.44±0.04c	1.26±0.01c	0.91±0.006d	1.32±0.03c
Efectos principales					
Si (mM)	0	1.71±0.1a	1.51±0.1a	1.29±0.2a	1.63±0.1a
	2	1.50±0.07b	1.30±0.04b	1.12±0.2b	1.43±0.1b
NaCl (mM)	0	1.68±0.1 ^a	1.48±0.1a	1.41±0.1a	1.65±0.1a
	100	1.52±0.1b	1.33±0.07b	1.00±0.08b	1.41±0.1b
Significancia ^y					
Si		***	***	***	***
NaCl		***	***	***	***
Si x NaCl		NS	***	NS	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 32. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de S en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Pecíolo	Fruto	Tallo	Raíz
		(g kg ⁻¹ peso seco)				
0	0	5.78±0.08b	2.70±0.03b	1.95±0.05a	1.81±0.01b	6.65±0.08b
0	100	5.07±0.05d	2.37±0.03c	1.56±0.02c	1.60±0.02c	6.95±0.08a
2	0	7.00±0.07a	3.07±0.02a	1.98±0.01a	2.14±0.04a	7.01±0.07a
2	100	5.61±0.05c	2.63±0.08b	1.67±0.03b	1.79±0.07b	7.13±0.1a
Efectos principales						
Si (mM)	0	5.43±0.3b	2.53±0.1b	1.75±0.2b	1.71±0.1b	6.80±0.1b
	2	6.3±0.7a	2.85±0.2a	1.83±0.1a	1.97±0.1a	7.07±0.1a
NaCl (mM)	0	6.39±0.6a	2.89±0.2a	1.97±0.04a	1.98±0.1a	6.83±0.2b
	100	5.34±0.2b	2.5±0.1b	1.61±0.06b	1.70±0.1b	7.04±0.1a
Significancia^y						
Si		***	***	***	***	***
NaCl		***	***	***	***	**
Si x NaCl		***	*	*	**	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 33. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de S en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos	Raíz
0	0	2.59±0.10a	1.27±0.02a	1.36±0.01a	1.76±0.06a	5.0±0.04b
0	100	1.85±0.05b	0.89±0.01c	1.16±0.03b	1.15±0.02c	3.60±0.1d
2	0	2.47±0.04a	1.25±0.04a	1.34±0.03a	1.65±0.03b	5.54±0.1a
2	100	1.79±0.06b	1.03±0.02b	1.31±0.01a	1.22±0.02c	3.8±0.070c
Efectos principales						
Si (mM)	0	2.22±0.4a	1.08±0.2b	1.26±0.1b	1.46±0.3a	4.3±0.7b
	2	2.13±0.3b	1.14±0.1a	1.3±0.02a	1.46±0.2a	4.7±0.9a
NaCl (mM)	0	2.53±0.1a	1.2±0.03a	1.3±0.02a	1.7±0.07a	5.2±0.2a
	100	1.8±0.06b	0.9±0.07b	1.2±0.08b	1.1±0.04b	3.7±0.1b
Significancia ^y						
Si		*	**	***	NS	***
NaCl		***	***	***	***	***
Si x NaCl		NS	***	***	***	*

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

La concentración de N en tomate, con el suministro de Si aumentó en la parte aérea de la planta y aún bajo salinidad como en tallo, pero en raíz no hubo diferencias respecto al testigo. Mientras que, en sorgo, la aplicación Si incrementó la concentración de N aún bajo estrés salino en raíz; en la parte aérea no hubo diferencias respecto al testigo, e incluso disminuyó la concentración de N en tallo de macollos.

La concentración de P en parte aérea de tomate incrementó con el suministro de Si en ausencia de estrés salino; por el contrario, en raíces, el Si causó incrementos en la concentración de este macronutriente, aún bajo estrés salino. En sorgo, en toda la planta no hubo diferencias respecto al testigo, disminuyendo independientemente de la condición de salinidad.

La concentración de K, en tomate, con el suministro de Si incrementó en parte aérea, pero sin salinidad, excepto en hojas, y sólo en fruto aumentó bajo salinidad; en raíz disminuyó. En el caso de sorgo, se redujo la concentración de K en parte aérea incluso con el suministro de Si sin la condición salina, excepto en tallo principal, donde, con la presencia de Si y aún bajo estrés salino aumentó, en raíz aumentó con la aplicación de Si independientemente de la salinidad.

La concentración de Ca en tomate tanto en parte aérea como en raíz, fue menor con el suministro de Si sin estrés salino, a excepción de hojas y fruto, donde fue mayor a pesar la salinidad. Mientras que, la concentración de Ca en todos los órganos de sorgo siempre fue menor con la aplicación de Si sin estrés salino que, en el testigo, únicamente en raíz fue mayor con suministro de Si y bajo salinidad.

La concentración de Mg en hojas y raíz de tomate, no mostraron cambios con el suministro de Si en ausencia de estrés salino; mientras que, en tallos de tomate, se registró la mayor concentración de Mg con la aplicación de Si. En el caso de sorgo, en todos los órganos se observó un efecto detrimental en la concentración de Mg con la aplicación de Si.

En tomate, la concentración de S en todos los órganos, excepto en raíz, aumentó con el suministro de Si; siendo dicho incremento de mayor magnitud cuando el Si se suministró de manera conjunta con 100 mM NaCl. En raíz de tomate no se observaron efectos

significativos del Si en la concentración de S. En sorgo, la concentración de S registrada en parte aérea de plantas tratadas con 2 mM Si y en el testigo, no presentó diferencias estadísticas. En raíces de sorgo, se observó que la concentración de S fue mayor con la aplicación de Si bajo estrés salino que en el tratamiento sin Si y sin salinidad.

Estos resultados son congruentes con lo reportado Liang *et al.* (2015), donde se menciona que la aplicación de Si incrementa la concentración de N, P, K, Ca, Mg y S, así como también de, Fe y Zn. Cu y B.

5.7.5. Micronutrientes

En la concentración de Fe en todos los órganos de tomate, la interacción de los factores de estudio fue significativa. El tratamiento 100 mM NaCl incrementó en 13.7, 34.8 y 39.7% la concentración de Fe en peciolo, tallo y raíz de tomate, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin Si y sin NaCl (**Cuadro 34**). En hojas y frutos de tomate, las concentraciones de Fe fueron variables no paramétricas significativas en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). Tanto en hojas como en frutos, se registraron las mayores concentraciones de Fe en el tratamiento 100 mM NaCl, superando al tratamiento sin Si y sin NaCl en 11.9 y 14.1%, respectivamente (**Cuadro 35**).

En sorgo, la concentración de Fe en hojas y tallo principal fue influenciada por la interacción de los factores de estudio. Los tratamientos 100 mM NaCl, 2 mM Si y 2 mM Si + 100 mM NaCl redujeron la concentración de Fe en hojas de sorgo en 8.8, 22.3 y 18.1%, con respecto al tratamiento sin Si y sin NaCl. Mientras que en tallo principal el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl incrementó 10.6 y 19% en comparación al testigo y al tratamiento 2 mM Si respectivamente. En lo que respecta a la concentración de Fe en raíces de sorgo, se observó que el Si causó un decremento de 10.4%; mientras que la adición de 100 mM NaCl la incrementó en 78.5% (**Cuadro 34**).

En sorgo, la concentración de Fe en vaina fue una variable no paramétrica significativa (**Cuadro 36**), registrándose la mediana más alta en el tratamiento 2 mM Si.

El efecto principal de NaCl fue significativo en la concentración de Cu en peciolo de tomate, observándose que, la adición de 100 mM NaCl la incrementa en 48.1%. Por otra

parte, el efecto de interacción de los factores de estudio fue significativo en la concentración de Cu en hoja y fruto de tomate, donde el tratamiento 100 mM la incrementó en 151.6 y 357.6%, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin Si y sin NaCl (**Cuadro 37**).

Por otra parte, las concentraciones de Cu en tallo y raíz fueron paramétricas y significativas en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**); ambas variables tuvieron la mayor mediana en el tratamiento 100 mM NaCl, superando en 73.1 y 49.7%, respectivamente, con respecto a los valores registrados en el tratamiento 2 mM (**Cuadro 35**).

Los tratamientos con Si sorgo redujeron la concentración foliar de Cu, dicha reducción fue mayor bajo estrés salino, con decremento de 47.3% con respecto al tratamiento sin Si y sin NaCl. Esta tendencia también se observó en la concentración de Cu en vaina y tallo de macollo, donde ambos tratamientos con Si tuvieron una media menor en 39.6 y 13.3%, respectivamente, al tratamiento sin Si y sin NaCl. Por otra parte, en tallo principal, la concentración de Cu fue reducida en 16.2% en el tratamiento 2 mM Si, con respecto al testigo. En raíces, los tratamientos 2 mM Si y 100 mM NaCl incrementaron la concentración de Cu en 12.3 y 10% respectivamente, en comparación con el testigo (**Cuadro 38**).

Con excepción del tallo, en el resto de órganos de tomate, la concentración de Zn fue significativa por efecto de la interacción de los factores de estudio (**Cuadro 39**). En peciolo, fruto y raíz, la concentración de Zn en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl fue superior en 192.3, 24.3 y 12.6%, respectivamente, en comparación con las concentraciones registradas en el tratamiento testigo. En hojas, la concentración de Zn fue mayor en el tratamiento 100 mM NaCl en 55.5%, respecto al testigo; mientras que, el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl fue mayor en 63.2%, también en comparación con el testigo. En tallo, la mayor concentración de Zn se tuvo en los tratamientos 2 mM Si y 100 mM NaCl con incrementos de 15 y 32.9% respecto al testigo. (**Cuadro 39**).

En sorgo, con excepción de las hojas, las concentraciones de Zn fueron influenciadas por la interacción de los factores de estudio como se observa en el **Cuadro 40**. En vaina,

tallo principal y tallo de macollo, la mayor concentración de Zn se registró en el tratamiento 2 mM Si, con aumentos de 39.4, 11.6 y 9%, respectivamente, en comparación con el testigo. En raíces, los tratamientos 100 mM NaCl y 2 mM Si + 100 mM NaCl ocasionaron decrementos significativos en la concentración de Zn con respecto al testigo, éstos del orden de 12.7 y 23.4%, respectivamente. Por otra parte, en hojas de sorgo, los efectos principales de Si y NaCl fueron significativos para la concentración de Zn, observándose que la adición de éstos causó un incremento de 4.8 y 26.3%, respectivamente (**Cuadro 40**).

La concentración de Mn en hoja, fruto, tallo y raíz de tomate fue significativa como resultado de la interacción de los factores de estudio (**Cuadro 41**). En hojas y raíces, los tratamientos 100 mM NaCl, 2 mM Si y 2 mM Si + 100 mM NaCl, redujeron la concentración de Mn en hojas en promedio en 15.1% y en raíces en 53.3%; en ambos casos, respecto al testigo. En frutos, el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl incrementó la concentración de Mn en 13.8%, respecto al testigo. En tallos, la concentración de Mn fue superior en 15.5% en el tratamiento 100 mM NaCl, con respecto al testigo (**Cuadro 41**). La variable concentración de Mn en peciolo fue no paramétrica y significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). En el **Cuadro 35**, se observa la mayor concentración de Mn en peciolo en el tratamiento 100 mM NaCl, que fue superior en 31.3% al tratamiento con la media menor (2 mM Si)

En vaina, tallo principal y raíces de sorgo, la concentración de Mn fue influenciada en forma significativa por la interacción de los factores de estudio; observándose que los tratamientos 100 mM NaCl y 2 mM + 100 mM NaCl causaron reducciones de 48.9 y 52% en vaina, de 48.6 y 57.1% en tallo principal y de 21 y 23.7% en raíces respectivamente, en todos los casos respecto al testigo. En hojas, destaca el incremento en la concentración de Mn en el tratamiento 100 mM NaCl, que superó al testigo en casi 6%. En el tallo de macollo, el tratamiento 2 mM y 100 mM NaCl redujeron la concentración de Mn en 21.8 y 61.8% respectivamente (**Cuadro 42**).

Efectos significativos de la interacción de los factores de estudio fueron observados en la concentración de B en hojas, peciolo, tallo y raíz de tomate (**Cuadro 43**), se observó que el tratamiento 100 mM NaCl la incrementó en 22.2, 28.6, 10.5 y 27.5%

respectivamente en comparación con el testigo. En frutos de tomate, la concentración de B fue una variable no paramétrica y significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**), observándose la mayor concentración de B en el tratamiento 2 mM Si + 100 mM NaCl, siendo mayor en 35.2% al tratamiento 2 mM Si que presentó la menor concentración de B (**Cuadro 35**).

En tallo principal y raíz de sorgo, el efecto de tratamiento (interacción de los factores de estudio) fue significativo para la concentración de B, registrándose incrementos de 8.8 y 16.4%, respectivamente, en comparación con el testigo (sin Si y sin NaCl), como se observa en el **Cuadro 44**. El efecto principal de NaCl fue significativo en vaina, donde el tratamiento 100 mM NaCl redujo la concentración de B en 11.2%. En tallo de macollo, los efectos de Si y NaCl fueron significativos en la concentración de B, la adición de Si redujo en 6.6%; por el contrario, el suministro de NaCl, la incrementó en 8.6%, en ambos casos con respecto al testigo. En hojas, la concentración de B fue una variable no paramétrica significativa en la prueba de Kruskal-Wallis (ver **Anexo B**). En el **Cuadro 36** se observa la mayor concentración foliar de B en el tratamiento 100 mM NaCl, que en relación al tratamiento con la menor concentración de este elemento (2 mM Si) fue superior en 42.6%.

De los micronutrientes determinados, tanto con y sin salinidad la aplicación de Si en tomate incrementó la concentración de Zn en peciolo y tallo. Al considerar únicamente a los nutrientes que incrementaron sólo bajo condición de salinidad se tuvo al Zn, Mn y B en fruto de tomate. Mientras que, en sorgo, al Fe en tallo P y, B en tallo P y raíz.

Cuadro 34. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Fe en tomate cv. El Cid F1 y sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Tomate			Sorgo		
		Pecíolo	Tallo	Raíz	Hojas	Tallo principal	Raíz
(mg kg ⁻¹ peso seco)							
0	0	51.1±2.4b	44.12±1.4b	820.0±17.2c	134.43±2.2a	24.49±1.2b	356.8±10.5c
0	100	58.1±4.5a	59.47±1.2a	1142.4±24.3a	122.6±3.2b	22.76±0.8bc	611.8±8.4a
2	0	36.4±3.9c	36.37±0.7c	656.5±9.2d	104.4±1.4c	21.82±0.4c	302.3±7.1d
2	100	54±0.5ab	60.51±1.3a	865.7±28.4b	110.1±3.7c	27.09±0.4a	566.2±9.4b
Efectos principales							
Si (mM)	0	54.6±5.0a	51.80±8.2a	981.2±173.4a	128.5±6.8a	23.62±1.3a	484.3±136.5a
	2	44.9±9.4b	48.4±12.94b	761.1±113.4b	107.3±4.0b	24.46±2.8a	434±141.3b
NaCl (mM)	0	43.8±8.3b	40.25±4.2b	738.3±88.3b	119.4±16.0a	23.16±1.6b	330±30.3b
	100	55.8±3.8a	59.99±1.3a	1004.0±149.9a	116.3±7.4b	24.9±2.4a	589±25.7a
Significancia [∧]							
Si		***	***	***	***	NS	***
NaCl		***	***	***	*	**	***
Si x NaCl		**	***	***	***	***	NS

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$]. [∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 35. Medianas de variables nutrimentales no paramétricas en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Peciolo	Fruto		Tallo	Raíz
		Fe	Mn	Fe	B	Cu	Cu
(mg kg ⁻¹ peso seco)							
0	0	106.12	149.97	50.16	15.20	5.95	59.33
0	100	118.77	171.14	64.77	17.02	21.49	68.28
2	0	103.13	130.39	56.3	14.84	5.12	34.36
2	100	111.49	154.05	63.77	20.07	7.03	49.74

Cuadro 36. Medianas de variables nutrimentales no paramétricas en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Vaina	Tallo de macollos
		B	Fe	Fe
(mg kg ⁻¹ peso seco)				
0	0	24.80	46.38	48.53
0	100	31.88	31.15	41.86
2	0	22.36	78.41	51.25
2	100	26.02	33.32	65.19

Cuadro 37. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Cu en tomate cv. El Cid

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Pecíolo	Fruto
		(mg kg ⁻¹ peso seco)		
0	0	4.57±0.1d	3.98±0.2b	5.14±0.1c
0	100	11.51±0.2a	6.01±0.5a	23.52±2.1a
2	0	6.79±0.2c	3.88±0.2b	5.13±0.3c
2	100	9.92±0.1b	5.69±0.2a	7.07±0.4b
Efectos principales				
Si (mM)	0	8.04±3.7b	4.99±1.1a	14.33±9.9a
	2	8.36±1.6a	4.78±0.9a	6.10±1.1b
NaCl (mM)	0	5.68±1.21b	3.93±0.2b	5.13±0.2b
	100	10.71±0.8a	5.82±0.4a	15.29±8.9a
Significancia [∧]				
Si		*	NS	***
NaCl		***	***	***
Si x NaCl		***	NS	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
[∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 38. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Cu en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (MM)	Hojas	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos	Raíz
0	0	15±0.30a	5.3±0.4b	3.74±0.2b	4.9±0.3b	39.93±1.1b
0	100	14.9±0.8a	11±0.6a	4.0±0.2ab	7±0.08a	44.76±0.7a
2	0	10.11±0.3b	3.44±0.2c	3.09±0.04c	4.44±0.2c	43.94±0.3a
2	100	7.93±0.1c	3.02±0.09c	4.53±0.3a	4.10±0.12c	32.89±0.3c
Efectos principales						
Si (mM)	0	15.02±0.5a	8.36±3.3a	3.89±0.2a	6.17±1.3a	42.34±2.72a
	2	9.02±1.1b	3.23±0.2b	3.81±0.8a	4.27±0.2b	38.41±5.91b
NaCl (mM)	0	12.6±2.67a	4.37±1.0b	3.41±0.3b	4.70±0.4b	41.93±2.27a
	100	11.5±3.79b	7.22±4.5a	4.29±0.3a	5.74±1.7a	38.82±6.36b
Significancia ^y						
Si		***	***	NS	***	***
NaCl		***	***	***	***	***
Si x NaCl		***	***	***	***	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 39. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Zn en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Pecíolo	Fruto	Tallo	Raíz
		(mg kg ⁻¹ peso seco)				
0	0	18.16±0.2b	13.63±0.8d	14.46±0.6c	18.87±0.8c	37.70±0.8c
0	100	28.23±1.3a	32.61±0.4b	15.98±0.2b	21.36±0.2b	50.11±0.7a
2	0	14.71±0.2c	15.59±0.3c	14.76±0.1c	21.88±0.5b	33.31±1.0d
2	100	29.64±0.6a	39.84±1.3a	17.98±0.2a	24.39±0.6a	42.46±0.4b
Efectos principales						
Si (mM)	0	23±5.4a	23.1±10.1b	15±0.9b	20.1±1.4b	43.9±6.6a
	2	22.18±7.9b	27.72±12.9a	16.37±1.7a	23.13±1.4a	37.89±4.9b
NaCl (mM)	0	16.4±1.8b	14.61±1.1b	14.6±0.4b	20.37±1.7b	35.51±2.5b
	100	29±1.2a	36.23±3.9a	17±1.0a	22.8±1.6a	46.3±4.1a
Significancia ^y						
Si		*	***	***	***	***
NaCl		***	***	***	***	***
Si x NaCl		***	***	**	NS	**

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 40. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Zn en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos	Raíz
		(mg kg ⁻¹ peso seco)				
0	0	17.94±0.3c	14.31±0.4b	15.97±0.8b	14.38±0.8ab	30.29±0.5a
0	100	23.43±0.4a	12.35±0.5c	15.34±0.8b	13.48±0.3bc	26.43±0.4b
2	0	19.52±0.3b	19.95±0.6a	17.82±0.4a	15.68±0.6a	29.32±0.4a
2	100	24±0.6a	12±0.3c	13±0.2c	11.8±1.1c	23.2±0.3c
Efectos principales						
Si (mM)	0	21±2.9b	13±1.1b	16±0.8a	13.9±0.7a	28.3±2.1a
	2	22±2.4a	16±4.4a	15±2.6a	13.7±2.2a	26.3±3.2b
NaCl (mM)	0	19±0.9b	17±3.0a	17±1.1a	15.0±0.9a	29.8±0.7a
	100	24±0.6a	12±0.5b	14±1.4b	13±1.1b	24.8±1.7b
Significancia ^y						
Si		***	***	NS	NS	***
NaCl		***	***	***	***	***
Si x NaCl		NS	***	***	**	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 41. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Mn en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Fruto	Tallo	Raíz
		(mg kg ⁻¹ peso seco)			
0	0	254.79±2.9a	18.78±0.5b	66.9±0.5c	828.48±19.9a
0	100	219.94±0.8b	15.07±0.5c	77.3±0.7a	350.1±9.6c
2	0	221.63±0.6b	17.86±0.3b	66.6±1.4c	657.1±10.3b
2	100	207.41±1.4c	21.37±0.4a	71.6±1.7b	317.19±18.7d
Efectos principales					
Si (mM)	0	237.3±18.7a	16.93±2.0b	72.1±5.5a	589.2±256a
	2	214.52±7.6b	19.61±1.9a	69.1±3.0b	487.1±182.2b
NaCl (mM)	0	238.2±17.8a	18.3±0.6a	66.7±1.0b	742.8±92.7a
	100	213.67±6.7b	18±3.3a	74.51±3.2a	333.6±22.3b
Significancia ^y					
Si		***	***	***	***
NaCl		***	NS	***	***
Si x NaCl		***	***	***	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 42. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de Mn en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos	Raíz
0	0	67±1.9b	58.03±1.1a	35±1.4a	37±0.8a	257.7±4.4a
0	100	71±1.0a	29.67±0.6c	18±0.2c	24±0.8c	203.7±2.8c
2	0	55±0.3c	46.97±0.8b	29±0.6b	30±0.5b	232.7±3.7b
2	100	56±0.7c	27.87±0.7c	15±0.4d	18±0.4d	196.5±5.2c
Efectos principales						
Si (mM)	0	68.88±2.2a	43.85±15.18a	26.23±8.9a	30.70±7.2a	230.7±29.0a
	2	55±0.5b	37±10.23b	22±7.2b	24±6.4b	215±19.8b
NaCl (mM)	0	61±6.5b	52.50±5.9a	32±3.2a	34±4.1a	245±13.8a
	100	63±7.9a	28.77±1.1b	17±1.3b	21±3.4b	200.1±5.4b
Significancia ^y						
Si		***	***	***	***	***
NaCl		**	***	***	***	***
Si x NaCl		*	***	**	NS	**

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 43. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de B en tomate cv. El Cid.

Si (mM)	NaCl (mM)	Hojas	Pecíolo	Tallo	Raíz
		(mg kg ⁻¹ peso seco)			
0	0	39.91±0.6c	25.29±0.4b	18.97±0.6c	29.66±0.9b
0	100	48.77±0.9a	32.52±1.2a	20.97±0.9a	37.83±0.4a
2	0	42.43±0.3b	26.49±0.4b	20.27±0.2ab	24.54±0.9c
2	100	42.32±0.2b	31.50±0.6a	19.51±0.3bc	29.82±0.6b
Efectos principales					
Si (mM)	0	44.34±4.8a	161±11.4a	19.97±1.3a	33.75±4.4a
	2	42.37±0.3b	142±12.4a	19.89±0.5a	27.18±2.9b
NaCl (mM)	0	41.17±1.4b	140±10.4b	19.62±0.8a	27.10±2.8b
	100	45.55±3.5a	162.4±9.5a	20.24±1.0a	33.82±4.3a
Significancia ^y					
Si		***	NS	NS	***
NaCl		***	***	NS	***
Si x NaCl		***	*	***	**

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
^yNo significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

Cuadro 44. Efectos principales de Si y NaCl e interacciones en la concentración de B en sorgo forrajero cv. Kikappo.

Si (mM)	NaCl (mM)	Vaina	Tallo principal	Tallo de macollos	Raíz
		(mg kg ⁻¹ peso seco)			
0	0	6.56±0.5a	6.22±0.1b	6.86±0.2b	11.09±0.4b
0	100	6.14±0.2ab	6.30±0.1b	7.65±0.1a	10.97±0.08b
2	0	6.61±0.3a	5.92±0.2b	6.60±0.3b	11.27±0.4b
2	100	5.57±0.2b	6.77±0.2a	6.97±0.2b	12.91±0.4a
Efectos principales					
Si (mM)	0	6.35±0.4a	6.26±0.1a	7.26±0.4a	11.03±0.2b
	2	6.09±0.6a	6.35±0.5a	6.78±0.3b	12.09±0.9a
NaCl (mM)	0	6.59±0.4a	6.07±0.2b	6.73±0.3b	11.18±0.4b
	100	5.85±0.3b	6.54±0.3a	7.31±0.4a	11.94±1.0a
Significancia [∧]					
Si		NS	NS	**	***
NaCl		**	***	***	**
Si x NaCl		NS	**	NS	***

Medias ± Desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas [Tukey (HSD), $p \leq 0.05$].
[∧]No significancia o significancia a $p \leq 0.05$, 0.01 y 0.001 fueron identificadas como NS, *, **, ***, respectivamente.

5.8. Cambios estructurales y de distribución de Si en la raíz de tomate y sorgo bajo estrés salino

Los cortes transversales en raíz de tomate observados en SEM en el tratamiento testigo conservan la integridad celular y hay diferenciación celular desde la epidermis hasta el haz vascular (**Figura 19A**). Con la aplicación 2 mM Si aunque se mantienen esas características, se observa un arreglo irregular de células principalmente a nivel de córtex (**Figura 19B**). Con la aplicación 100 mM NaCl hubo pérdida en la integridad celular y escasa diferenciación desde la epidermis a la endodermis y lo que podría ser un daño celular en la zona central del haz vascular (**Figura 19C**). Por el contrario, al agregar en conjunto 100 mM NaCl con 2 mM Si no existe claridad en la diferenciación celular entre epidermis y córtex y a nivel del haz vascular (**Figura 19D**).

En el caso del sorgo, las observaciones de raíz mediante SEM mostraron que, en el testigo, al igual que en tomate, se conserva la integridad y diferenciación celular desde la epidermis hasta el haz vascular (**Figura 20A**). En el tratamiento 2 mM Si se observaron a nivel de córtex falta de estructura e integridad celular (**Figura 20B**). De forma similar, con la aplicación 100 mM NaCl hubo pérdida en la integridad celular del córtex sin afectar la epidermis (**Figura 20C**). En el tratamiento 100 mM NaCl + 2 mM Si hubo secciones del córtex en que se mantuvieron íntegras y diferenciadas (**Figura 20D**).

5.8.1. Microanálisis cualitativo de la distribución elemental en raíces

Silicio

Tanto en tomate como en sorgo, en ninguna sección de raíz en los dos tratamientos sin, es decir, en el testigo y el tratamiento 100 mM NaCl, no se detectó incidencia de Si (**Cuadro 45, Figuras 19E, 19I, 19M, 19P, 20E, 20I, 20M y 20P**). De la misma manera, en córtex de raíces de tomate y sorgo no se detectó Si (**Cuadro 45, Figuras 19K, 19J, 19L, 20K, 20J y 20L**), aún con la aplicación de 2 mM Si (solo y en conjunto con 100 mM NaCl).

En la epidermis de la raíz de tomate, fue mayor la incidencia de Si con el tratamiento 100 mM NaCl + 2 mM Si que con 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19H y 19F**); mientras que,

en la epidermis de la raíz en sorgo la mayor acumulación de Si se observó en el tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 20F y 20H**).

En la endodermis de raíces de tomate, fue similar la incidencia de Si en los dos tratamientos con la aplicación de 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19N y 19O**), en tanto que, en la endodermis radical de sorgo solo se detectó Si en el tratamiento 100 mM NaCl + 2 mM Si (**Cuadro 45, Figura 20O**).

A nivel de xilema, en tomate únicamente se detectó Si en los tratamientos 100 mM NaCl y 2 mM Si, habiendo con 2 mM Si mucho mayor incidencia de Si (**Cuadro 45, Figuras 19R y 19Q**). Respecto al sorgo, no se identificó Si en ningún tratamiento (**Cuadro 45, Figuras 20R, 20Q y 20S**).

Sodio

En tomate y sorgo, se detectó Na en todas las secciones de raíz de plantas de todos los tratamientos excepto en el testigo, donde no se identificó (**Cuadro 45, Figuras 19E, 19I, 19M, 19P, 20E, 20I, 20M y 20P**). A nivel de epidermis de raíces de tomate, la incidencia de Na no presentó diferencia entre tratamientos (**Cuadro 45, Figuras 19G, 19F y 19H**); mientras que, en epidermis radical de sorgo, la incidencia de Na fue mayor en el tratamiento 100 mM NaCl, seguida del tratamiento 100 mM NaCl+ 2 mM Si y del tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 45 y Figuras 20G, 20H y 20F**).

En el córtex de raíz, el patrón de la incidencia de Na fue el mismo en ambos cultivos, la mayor incidencia se tuvo en el tratamiento 100 mM NaCl + 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19L y 20L**), seguida del tratamiento 100 mM NaCl (**Cuadro 45, Figuras 19K y 20K**), y la menor incidencia de Na en córtex se tuvo con el tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19J y 20J**).

Tanto en endodermis como en xilema de las dos especies, la incidencia de Na fue mayor con el tratamiento 100 mM NaCl (**Cuadro 45, Figuras 19Ñ, 19R, 20Ñ y 20R**); mientras que, en los tratamientos con 2 mM Si fue mucho menor la incidencia de Na (**Cuadro 45, Figuras 19N, 19O, 19S, 20N, 20O, 20Q y 20S**).

Cloro

En todas las secciones de raíces de tomate de todos los tratamientos se identificó Cl, con excepción del testigo (**Cuadro 45 y Figuras 19E, 19I, 19M y 19P**). En epidermis radical de tomate, el orden de incidencia de Cl, fue de mayor a menor como sigue: 100 mM NaCl + 2 mM Si, 100 mM NaCl y 2 mM Si. En epidermis radical de sorgo, la incidencia de Cl siguió el siguiente orden descendente: 100 mM NaCl, 100 mM NaCl + 2 mM Si y 2 mM Si.

A nivel de córtex y en ambos cultivos, la mayor incidencia de Cl se registró en el tratamiento 100 mM NaCl + 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19L y 20L**), seguido del tratamiento 100 mM NaCl (**Cuadro 45, Figuras 19K y 20K**), con la menor incidencia en el tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19J y 20J**). Cabe destacar, que el patrón observado en Cl fue el mismo que para Na. En endodermis radical, también hubo el mismo patrón en ambos cultivos, la mayor incidencia se observó en el tratamiento 100 mM NaCl (**Cuadro 45, Figuras 19K y 20K**), luego en 100 mM NaCl + 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19L y 20L**) y el menor en el tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19J y 20J**). Cabe destacar, que también fue el mismo patrón que con Na.

En cuanto al xilema, tanto en tomate y sorgo, los tratamientos con menor incidencia de Cl fueron el testigo y 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19P, 19Q, 20P y 20Q**). Sin embargo, el tratamiento de mayor incidencia de Cl fue 100 mM NaCl en tomate (**Cuadro 45 y Figura 19R**) y 100 mM NaCl + 2 mM Si en sorgo (**Cuadro 45 y Figura 20S**).

Potasio

A nivel de epidermis de raíz, en ambos cultivos la mayor incidencia de K se tuvo con la aplicación 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19F y 20F**).

En córtex, para tomate y sorgo, la menor incidencia de K se identificó en los dos tratamientos con NaCl (**Cuadro 45, Figuras 19K, 19L, 20K y 20L**); en tomate, la mayor incidencia de K se registró en el testigo, seguida del tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19I y 19J**). Por el contrario, en sorgo, la mayor incidencia de K se encontró con el tratamiento 2 mM Si, y luego en el testigo (**Cuadro 45, Figuras 20J y 20I**).

En la endodermis radical, la incidencia de K presentó el mismo patrón en las dos especies, la mayor incidencia estuvo en el tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19J y 20J**), luego en el testigo (**Cuadro 45, Figuras 19M y 20M**) y la menor en los tratamientos 100 mM NaCl y 100 mM NaCl + 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19K, 19L, 20K y 20L**).

En el xilema radical de tomate y sorgo, la mayor incidencia de K se presentó en el testigo (**Cuadro 45, Figuras 19P y 20P**); luego, para tomate en el tratamiento 2 mM Si (**Cuadro 45, Figura 19Q**) y la menor en los tratamientos 100 mM NaCl y 100 mM NaCl + 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 19R y 19S**). Mientras que, en sorgo, continuó en 100 mM NaCl (**Cuadro 45, Figura 20R**), y los de menor incidencia fueron los tratamientos 2 mM Si y 100 mM NaCl + 2 mM Si (**Cuadro 45, Figuras 20Q y 20S**). A nivel de epidermis, en ambos cultivos la mayor incidencia de K estuvo con la aplicación 2 mM Si (**Cuadro 45, Figura 19F y Figura 20F**).

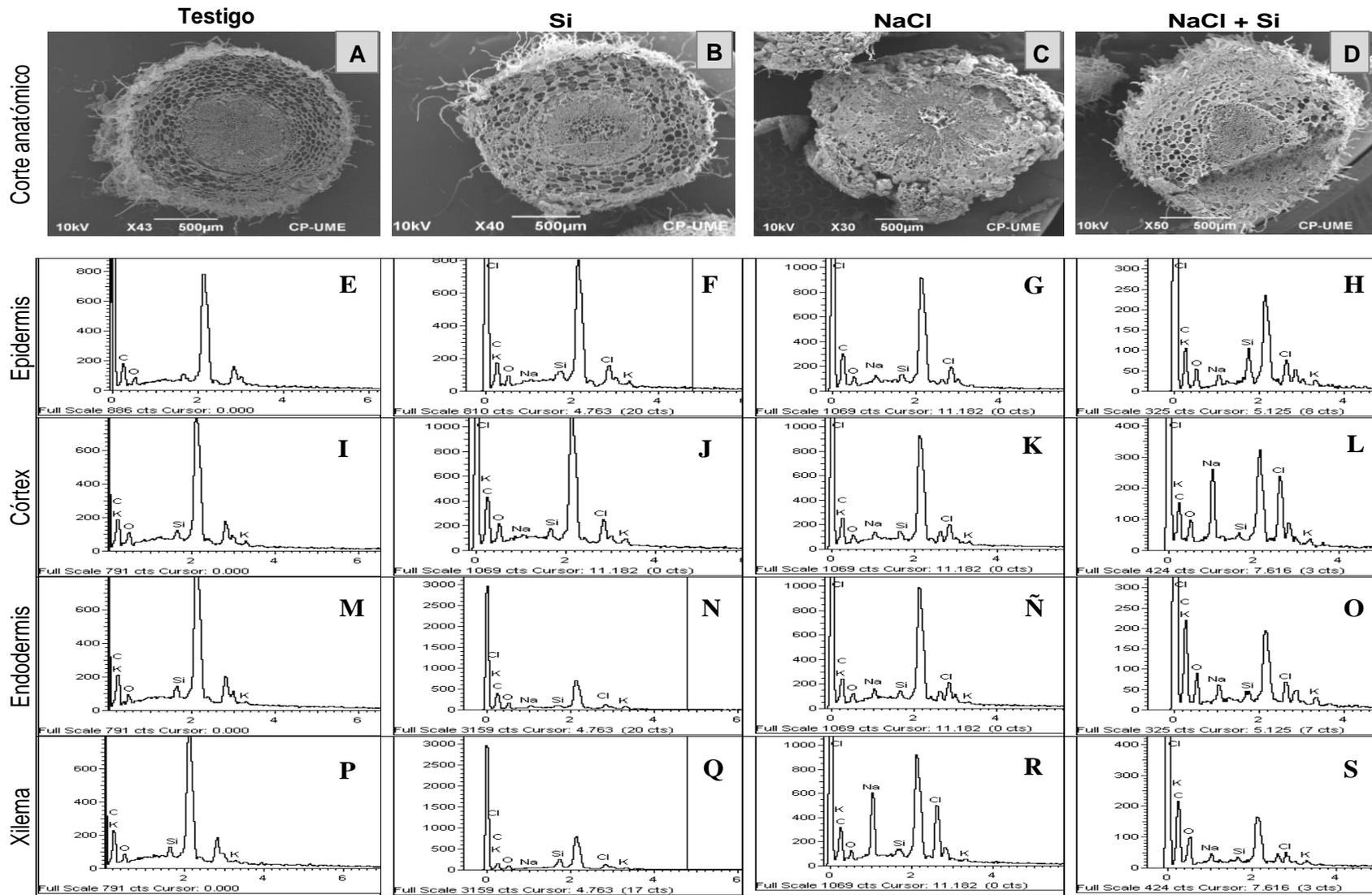


Figura 19. Cortes transversales de raíz (A-D) y microanálisis por espectroscopía de rayos-X de energía dispersiva (E-S) de tomate cv. El Cid F1. Los tratamientos aplicados fueron 2 mM Si (Si), 100 mM NaCl (NaCl), 100 mM NaCl con 2 mM Si (NaCl+Si) y un **testigo**.

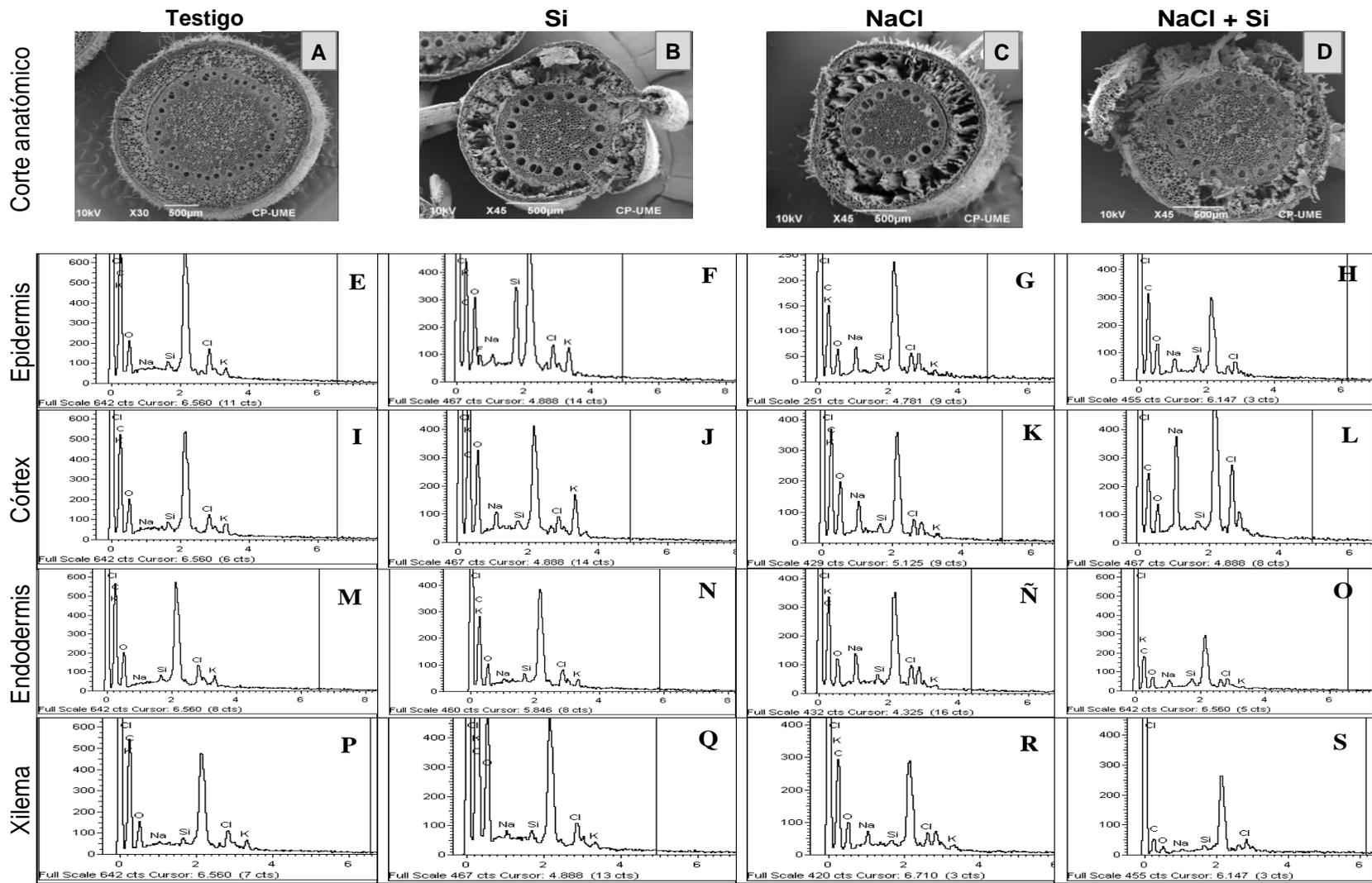


Figura 20. Cortes transversales de raíz (A-D) y microanálisis por espectroscopía de rayos-X de energía dispersiva (E-S) de sorgo forrajero cv. Kikappo. Los tratamientos fueron 2 mM Si (Si), 100 mM NaCl (NaCl), 100 mM NaCl con 2 mM Si (NaCl+Si) y un **testigo**.

Cuadro 45. Porcentajes relativos del elemento detectado durante el microanálisis cualitativo SEM-EDS por secciones en raíz de tomate cv. El Cid F1 y de sorgo forrajero cv. Kikappo.

Sección	Elemento	Tomate				Sorgo			
		Testigo	100 mM NaCl	2 mM Si	100 mM NaCl + 2 mM Si	Testigo	100 mM NaCl	2 mM Si	100 mM NaCl + 2 mM Si
		Peso relativo (%)							
Epidermis	C K	55.9	63.44	23.64	36.85	49.54	42.38	25.6	56.4
	O K	44.1	19.42	39.84	20.58	35.60	25.47	31.3	27.2
	Na K	-	3.98	3.38	3.61	-	7.99	1.82	4.11
	Si K	-		8.34	11.24	-	-	15.3	4.11
	Cl K	-	13.16	9.21	22.58	6.04	19.14	4.62	8.09
	K K	-	-	15.59	5.13	8.81	5.02	13.5	-
	F K	-	-	-	-	-	-	7.66	-
Córtex	C K	23.4	41.35	32.90	21.20	39.02	44.52	32.1	46.2
	O K	53.9	22.00	41.99	17.73	41.91	34.58	39.8	14.2
	Na K	-	5.68	3.36	17.38	-	7.79	3.38	13.8
	Si K	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cl K	-	24.40	6.94	38.98	2.99	10.26	3.78	25.6
	K K	22.5	6.56	14.81	4.72	16.09	2.85	20.8	-
Endodermis	C K	33.4	39.48	30.07	43.51	43.95	49.46	38.8	49.8
	O K	49.4	22.65	38.68	27.39	41.16	23.07	40.7	24.3
	Na K	-	7.27	4.85	4.82	-	7.88	2.57	4.74
	Si K	-	-	2.35	2.23	-	-	-	4.51

	Tomate					Sorgo			
	Testigo	100 mM NaCl	2 mM Si	100 mM NaCl + 2 mM Si		Testigo	100 mM NaCl	2 mM Si	100 mM NaCl + 2 mM Si
Sección	Elemento	Peso relativo (%)							
Endodermis	Cl K	-	25.14	3.42	15.04	3.13	16.70	4.28	13.2
	K K	17.0	5.47	20.63	7.01	11.75	2.89	13.6	3.30
Xilema	C K	40.6	32.49	27.31	46.07	52.23	53.53	48.9	55.9
	O K	44.8	8.74	30.53	35.28	32.93	25.90	46.1	19.8
	Na K	-	17.31	-	3.61	-	4.01	0.88	2.62
	Si K	-	0.95	26.30	-	-	-	-	-
	Cl K	-	38.32	6.94	10.02	5.07	12.47	1.43	21.5
	K K	14.4	2.19	8.93	5.03	9.78	4.09	2.65	-

-, elemento no detectado. K, orbital de energía.

Los resultados del análisis anatómico de raíz en tomate y sorgo con la aplicación 100 mM NaCl son congruentes con daños por salinidad, que puede afectar el potencial de crecimiento y la morfología (Lucero *et al.*, 2022). Por otro lado, el mayor grado de integridad celular con la aplicación de 100 mM NaCl en conjunto de 2 mM Si en ambos cultivos, se asocia a reportes donde ante la situación de estrés salino el suministro de Si mitiga los daños (Coskun *et al.*, 2019). Sin embargo, es contrario a lo esperado para tomate que teóricamente tiene una eficiencia considerablemente menor en la actividad de las proteínas Lsi1 y Lsi2 de influjo y eflujo (Deshmukh *et al.*, 2015) y, por tanto, se esperaba igual grado de daño celular que con 100 mM NaCl.

Por otra parte, en el tratamiento 2 mM Si, no se observó la misma integridad celular que en el testigo, se relaciona con el hecho de haber estado bajo un sistema hidropónico y la

adición de más solutos, en comparación al testigo, pudo provocar un estrés osmótico afectando la integridad celular (Munns & Tester, 2008; Lucero *et al.*, 2022) pero en menor grado que bajo la condición de salinidad, o bien, es de considerarse que la adición de Si a la solución generó incrementos en el pH de la solución, que se sabe presenta estabilidad a un amplio rango de pH (Takeno, 2005) y la mayor solubilidad de sílice soluble es a pH mayores de 8 (Kazadi *et al.*, 2016), siendo las consecuencias generadas a nivel fisiológico por el cambio de pH causantes de una alteración celular. En plantas dicotiledóneas se ha reportado un incremento en el tamaño celular debido a la acumulación de iones Cl^- y Na^+ como uno de los mecanismos de defensa contra el estrés salino, en cambio para monocotiledóneas no se ha identificado dicho comportamiento (Munns & Tester, 2008).

La acumulación de Si en epidermis y endodermis de raíz se ha mencionado en diversos trabajos (Fleck *et al.*, 2015; Frew *et al.*, 2018; Javaid *et al.*, 2019), a partir de lo cual deriva un mecanismo de defensa para la planta en condiciones de salinidad, ya que la capa de sílice impide la entrada de iones como Na^+ y Cl^- (Coskun *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2019). Mediante el microanálisis SEM-EDS se detectó la presencia de Si en ambas especies, con diferencias en el patrón de acumulación, en tomate fue mayor bajo la condición de estrés salino, y en sorgo, fue mayor con 2 mM Si en epidermis y con 100 mM NaCl + 2 mM Si en endodermis. Esto va acorde a que bajo condiciones de estrés el Si tiene un efecto en tomate aun sin presentar Lsi1 y Lsi2 permeables a Si (Deshmukh *et al.*, 2015). Mientras que, en sorgo, la diferencia entre tratamientos es la ausencia de Si bajo salinidad, dado que sí cuenta con las proteínas permeables a Si (Deshmukh *et al.*, 2015; Coskun *et al.*, 2019). Además, en el caso del sorgo, se debe considerar también las condiciones bajo las cuales se deposita y acumula el Si, ya que se ha mencionado de la necesidad de que exista una red de fenoles sobre la cual las deposiciones de sílice se puedan formar (Frew *et al.*, 2018). Pues bajo condiciones de salinidad, otro mecanismo de protección de la planta es el engrosamiento de la banda de Caspary (García *et al.*, 2011; Lux *et al.*, 2020), por ello, en el tratamiento 100 mM NaCl + 2 mM Si fue mayor la incidencia de Si en endodermis. Mientras que, en xilema no se detectó Si en ningún tratamiento, lo cual podría deberse a la presencia de Lsi2 que promovió su

desplazamiento hasta la zona del xilema para que el Si fuera cargado al xilema por Lsi6 y su traslocación al vástago por Lsi3 (Katz *et al.*, 2021).

Los patrones de distribución de Na⁺ en ambas especies fueron muy similares en las diferentes secciones de la raíz. Se destaca su incidencia en xilema, donde fue mayor en el tratamiento 100 mM NaCl que en 100 mM NaCl + 2 mM Si, ya que, en la mayoría de plantas, el Na⁺ se acumula en las láminas foliares, lo que se determina principalmente por los procesos que controlan el suministro de Na⁺ al xilema en raíz (Munns & Tester, 2008), entonces, una disminución de Na⁺ en xilema reduce su traslocación al vástago.

De la misma manera, el Cl⁻ tuvo un comportamiento similar en ambos cultivos, donde la menor incidencia se encontró en el tratamiento 2 mM Si y el testigo. A nivel de epidermis, la aplicación de 2 mM Si no disminuyó la incidencia de Cl⁻ más que en sorgo. Mientras que, en endodermis sí se disminuyó en ambos cultivos, pero la detección de Cl⁻ en sorgo fue mayor con el tratamiento 100 mM NaCl + 2 mM Si y en tomate con 100 mM NaCl. El flujo de Cl⁻ en raíces está mediado por canales aniónicos regulados por ácido abscísico, una hormona relacionada a condiciones de estrés, que limitan la transferencia de Cl⁻ a la parte aérea de la planta bajo salinidad (Munns & Tester, 2008). Entonces, estas diferencias entre tomate y sorgo, contrastantes a nivel de epidermis y xilema, se pueden deber a la respuesta fisiológica de cada especie. Además, se ha reportado que el problema por toxicidad de Na⁺ es de mayor relevancia que el de Cl⁻, ya que las plantas cuentan con un mejor sistema de exclusión de Cl⁻ que de Na⁺ (Munns & Tester, 2008).

En los sitios de absorción de la planta, las elevadas concentraciones de Na⁺ desplazan la absorción de K⁺ (Munns & Tester, 2008), este proceso de antagonismo provoca una deficiencia de K en la planta y por ende se afecta su óptimo desarrollo. En ambos cultivos, con la aplicación 2 mM Si se tuvo la mayor incidencia de K en epidermis y endodermis, es decir, que la presencia de Si mitigó el proceso de antagonismo entre Na⁺ y K⁺. Se ha reportado en especies como pepino (*Cucumis sativus*), que con Si se ha incrementado la absorción de K⁺ y se ha reducido la de Na⁺ en condiciones de salinidad (Debona *et al.*, 2017; Khan *et al.*, 2019). Esto difiere con los resultados obtenidos en xilema, ya que no fueron acorde a lo esperado por tratamientos y especie vegetal, más que en el testigo donde se detectó la mayor incidencia, lo cual se atribuye a la naturaleza dinámica del K⁺

como ion libre (Hawkesford *et al.*, 2011) y a que transportadores de Si se pueden ver afectados por las respuestas fisiológicas de la planta (Katz *et al.*, 2021).

VI. CONCLUSIÓN

Existen diferencias en el patrón de acumulación de Si a nivel de endodermis de raíz entre especies vegetales.

El Si mejora las respuestas para mitigar efectos adversos por salinidad como capacidad antioxidante, concentración de H_2O_2 y de prolina, siendo de mayor importancia en hojas y peciolo de tomate y hojas y vaina de sorgo.

El suministro de Si no afecta consistentemente las variables de crecimiento y fisiológicas independientemente de la condición de salinidad.

El Si incrementa la concentración nutrimental en los diferentes órganos de tomate más que en los órganos de sorgo.

Hay mejores repuestas ante el suministro de Si y más puntos de detección de Si en tejidos de raíz de tomate que en el sorgo.

Las variables evaluadas en relación a la expansión celular, acumulación de Si en epidermis y endodermis, reducción en la incidencia de Na^+ y de Cl^- (excepto en sorgo) fueron respuestas a la salinidad que con el suministro de Si aumentaron. Así como el incremento en la absorción de K^+ en presencia de Si y con elevadas concentraciones de Na^+ . Evidenciando así, que el Si mejora las respuestas para mitigar efectos adversos por salinidad, pero hay diferencias cuando dichas respuestas están dadas más allá de la exposición de Si, pues influye en gran medida la fisiología de cada especie.

VII. LITERATURA CITADA

- Alcántar, & Sandoval. (1999). *Manual de análisis químico de tejido vegetal*. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. In: Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.
- Amtmann, A., & Beilby, M. J. (2010). The role of ion channels in plant salt tolerance. In: Demidchik, V. & Maathuis, F. (Eds.) *Ion channels and plant stress responses*. Signaling and Communication in Plants. Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10494-7_2 in plant salt tolerance (pp. 23–46).
- Bates, L.S., Waldren, R.P., & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Gutiérrez, T.J.M. (2003). El cultivo de sorgo (*Sorghum Vulgare* Spp.). Tesis de licenciatura inédita. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” División de Agronomía.
- Cabezas A.G., Camus F.A., Condori W.E., Andrés F.G., & Mazuela P.A. (2022). El silicio (Si) y su efecto mitigador del estrés salino en cultivos hortícolas. *IDESIA*. 40(1), 129-133. 10.4067/S0718-34292022000100129
- Castañeda, B.C., Ramos, LL. E., & Ibáñez, V.L. (2008). Evaluación de la capacidad antioxidante de siete plantas medicinales peruanas. *Revista Horizonte Médico*, 8(1), 56–72. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=371637117004>
- Che, J., Yamaji, N., & Ma, J.F. (2018). Efficient and flexible uptake system for mineral elements in plants. *New Phytologist*, 219(2), 513–517. <https://doi.org/10.1111/nph.15140>
- Clymans, W., Struyf, E., Govers, G., Vandevenne, F., & Conley, D.J. (2011). Anthropogenic impact on amorphous silica pools in temperate soils. *Biogeosciences*. 8(8), 2281–2293. <https://doi.org/10.5194/bg-8-2281-2011>
- Coradin, T., & Livage.L. (2001). Effect of some amino acids and peptides on silicic acid polymerization. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 21(4), 329–336. [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(01\)00143-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(01)00143-6)
- Coskun D, Britto DT, Huynh WQ, Kronzucker HJ. 2016. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in Plant Science* 7: 1072. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01072>
- 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>
- Coskun, D., Deshmukh, R., Shivaraj, S.M., Isenring, P., & Bélanger. R.R. (2021). Lsi2: A black box in plant silicon transport. *Plant Soil*, 466.1–20. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05061-1>

- Crang, R., Lyons-Sobaski, S., & Wise, R. (2018). Plant anatomy. A concept-based approach to the structure of seed plants. *Springer nature*. 732 p. <https://doi.org/10.1038/2251078a0>
- de la Rosa R.R., Lara, H.A., Lozano, G.J., Padilla, B.L.E., Avelar, M.J., & Castañeda, M.R. (2016). Rendimiento y calidad de tomate en sistemas hidropónicos abierto y cerrado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 17, 3439–3452. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263149506005>
- Currie, H.A., Perry, C.C. (2007). Silica in plants: Biological, biochemical and chemical studies. *Annals of Botany* 100(7): 1383–1389. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm247>
- Debona, D., Rodrigues, F.A., & Datnoff, L.E. (2017). Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annual Review of Phytopathology*. 55, 85–107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>
- Deshmukh, R. K., Vivancos, J., Ramakrishnan, G., Guérin, V., Carpentier, G., Sonah, H., Labbé, C., Isenring, P., Belzile, F. J., & Bélanger, R. R. (2015). A precise spacing between the NPA domains of aquaporins is essential for silicon permeability in plants. *Plant Journal*, 83(3), 489–500. <https://doi.org/10.1111/tpj.12904>
- Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91(1), 11–17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
- Esquivel, B. A. (2017). Respuesta al estrés salino por cloruro de sodio y agua de mar en la fase de crecimiento de dos tipos de tomate en un sistema hidropónico de raiz flotante. Centro de investigaciones biológicas del noreste.
- Exley, C. (2015). A possible mechanism of biological silicification in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6:853. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00853>
- Faisal, S., Callis, K.L., Slot, M., & Kitajima, K. (2012). Transpiration-dependent passive silica accumulation in cucumber (*Cucumis sativus*) under varying soil silicon availability. *Botany*, 90(10), 1058–1064. <https://doi.org/10.1139/b2012-072>
- Fleck, A. T., Schulze, S., Hinrichs, M., Specht, A., Waßmann, F., Schreiber, L., & Schenk, M. K. (2015). Silicon promotes exodermal casparian band formation in Si-accumulating and Si-excluding species by forming phenol complexes. *PLoS ONE*, 10(9), 1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138555>
- Franzoni, G., Cocetta, G., Prinsi, B., Ferrante, A., & Espen L. (2022). Biostimulants on crops: their impact under abiotic stress conditions. *Horticulturae* 8(3): 189. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030189>
- Frew, A., Weston, L. A., Reynolds, O. L., & Gurr, G. M. (2018). The role of silicon in plant biology: A paradigm shift in research approach. *Annals of Botany*, 121(7), 1265–1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>

- García, M., Medina, E., & Jáuregui, D. (2011). Salt-induced changes in roots of two sugar cane (*Saccharum* sp., poaceae) genotypes. *Acta Botanica Venezuelica*, 34(1), 177–97.
- García, V. (2014). Desarrollo e implección de sensores para medir potencial hídrico en hojas de planta. Tesis de maestría inédita. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.60p.
<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/758/1/15953.pdf>
- Gattullo, C. E., Allegretta, I., Medici, L., Fijan, R., Pii, Y., Cesco, S., Mimmo, T., & Terzano, R. (2016). Silicon dynamics in the rhizosphere: Connections with iron mobilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179(3), 409–417.
<https://doi.org/10.1002/jpln.201500535>
- Gómez, M.F.C., Trejo, T.L.I., García, J.A., Escobar, S.H.F., Ramírez, O.S.M. (2020). Silicon flow from root to shoot in pepper: a comprehensive *in silico* analysis reveals a potential linkage between gene expression and hormone signaling that stimulates plant growth and metabolism. *PeerJ* 8: e10053.
<https://doi.org/10.7717/peerj.10053>
- Gong, H. J., Randall, D. P., & Flowers, T. J. (2006). Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. *Plant, Cell and Environment*, 29(10), 1970–1979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01572.x>
- Guerriero, G., Hausman, J. F., & Legay, S. (2016). Silicon and the plant extracellular matrix. *Frontiers in Plant Science*, 7:463 <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463>
- Handreck, K. A., & Jones, L. H. (1967). Uptake of monosilicic acid by *Trifolium incarnatum* (L.). *Australian Journal of Biological Sciences*, 20(2), 483–85.
<https://doi.org/10.1071/bi9670483>
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxová, M., & Lux, A. (2005). Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Physiologia Plantarum*, 123(4), 459–466. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2011). Functions of Macronutrients. En *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 135–89). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Henriet, C., Draye, X., Oppitz, I., Swennen, R., & Delvaux. B. (2006). Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa* spp.) under controlled conditions. *Plant Soil*, 287, 359–3574. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9085-4>
- Hodson, M. J., White, P. J., Mead, A., & Broadley, M. R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 96(6), 1027–1046.
<https://doi.org/10.1093/aob/mci255>

- Hoffmann, J., Berni, R., Hausman, J.F., & Guerriero, G. (2020). A review on the beneficial role of silicon against salinity in non-accumulator crops: Tomato as a model. *Biomolecules* 10(9): 1284. <https://doi.org/10.3390/biom10091284>
- Ibarra, E. E., Pacheco, S. M., García, M. R., San Miguel, C. R., Gustavo, R. V., & Soto, H. R. M. (2011). Actividad antioxidante de *Erythrina americana* Miller. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(4), 241–246. <https://doi.org/10.35196/rfm.2011.4.241>
- 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>
- Katz, O., Puppe, D., Kaczorek, D., Prakash, N. B., & Schaller, J. (2021). Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. *Plants*, 10(4): 652. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>
- Kauss, H., Seehaus, K., Franke, R., Gilbert, S., Dietrich, R. A., & Kröger, N. (2003). Silica deposition by a strongly cationic proline-rich protein from systemically resistant cucumber plants. *Plant Journal*, 33(1), 87–95. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2003.01606.x>
- Kazadi, D.M., Groot, D., Steenkamp, J.D. & Pöllmann. H. (2016). Control of silica polymerisation during ferromanganese slag sulphuric acid digestion and water leaching. *Hydrometallurgy*, 166, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.06.024>
- Khan, A., Khan, A. L., Muneer, S., Kim, Y.H., Al-Rawahi, A., & Al-Harrasi, A. (2019). Silicon and salinity: crosstalk in crop-mediated stress tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 10:1429. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01429>
- Klotzbücher, T., Treptow, C., Kaiser, K., Klotzbücher, A., & Mikutta, R. (2020). Sorption competition with natural organic matter as mechanism controlling silicon mobility in soil. *Scientific Reports*, 10, 11225.-<https://doi.org/10.1038/s41598-020-68042-x>
- Kumar, S., & Elbaum, R. (2018). Interplay between silica deposition and viability during the life span of sorghum silica cells. *New Phytologist*, 217(3), 1137–1145. <https://doi.org/10.1111/nph.14867>
- Kumar, S., Milstein, Y., Bрами, Y., Elbaum, M., & Elbaum, R. (2017). Mechanism of silica deposition in sorghum silica cells. *New Phytologist*, 213(2), 791–798. <https://doi.org/10.1111/nph.14173>
- Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., Troncoso, A. M., Mancini-Filho, J., & Fett, R. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 25(4), 726–732. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612005000400016>

- Lanning, F.C., & Eleuterius, L.N. (1989). Silica deposition in some C3 and C4 species of grasses, sedges and composites in the USA. *Annals of Botany*, 64(4), 395–410. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087858>
- Liang, Y., Hua, H., Zhu, Y.G., Zhang, J., Cheng, C., & Römheld, V. (2006). Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. *New Phytologist*, 172(1), 63–72. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01797.x>
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., & Song, A. (2015). Silicon in Agriculture. En *Silicon in Agriculture*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>
- Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., & Zhang, S. (2014). Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4747–4756. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru220>
- López, P.I.C., González, D.G.M., Escobosa, M.I.G., Cárdenas, V.S., Núñez, F.R., Soto, R.O., & Ruiz, C.A. (2020). Respuesta fisiológica diaria del tomate a la aplicación de silicio bajo condiciones de salinidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(2), 339–52. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.1917>
- López, M.L.M. (2016). Manual técnico del cultivo de tomate. *Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA)*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf> <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf> <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/3143/1/BVE17079148e.pdf> <http://repositorio.iica.int/bitstream/11324/3143/1/BVE17079148e.pdf>
- Lucero, C. C., Di Filippo, M., Vila, H., & Venier, M. (2017). Comparación de las respuestas al estrés hídrico y salino de los portainjertos de vid 1103P y 101-14Mgt, injertados con Cabernet Sauvignon. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49(1), 33–43.
- Lucero, G., Andrea, Valdez; Caro, B., Hernández, M. L. G., Rivas, G. T., & Murillo, A. B. (2022). Respuesta de *Origanum vulgare* L. al estrés por NaCl. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(046), 1–12.
- Lux, A., Lukačová, Z., Vaculík, M., Švubová, R., Kohanová, J., Soukup, M., Martinka, M., & Bokor, B. (2020). Silicification of root tissues. *Plants*, 9(1), 111. <https://doi.org/10.3390/plants9010111>
- Ma, J. F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1), 11–18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2015). A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, 20(7), 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>

- Maceda, A., Soto, M.H., Peña, C.V., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignin: composition, synthesis and evolution. *Madera y Bosques*, 27(2):e2722137 <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Martínez, B. M. (2011). Capítulo 11. Silicio. En *Materiales y Materias Primas* (p. 43). Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Matichenkov, V.V., Bocharnikova, E.A., Kosobryukhov, A.A., & Biel, K.Ya. (2008). Mobile forms of silicon in plants. *Doklady Biological Sciences*, 418(1), 39–40. <https://doi.org/10.1134/s0012496608010134>
- Mir, R.A., Bhat, B.A., Yousuf, H., Islam, S.T., Raza, A., Rizvi, M.A., Charagh, S., Albaqami, M., Sofi, P.A., Zargar, S.M. (2022). Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. *Frontiers in Plant Science* 13: 819658. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>
- Montpetit, J., Vivancos, J., Mitani-Ueno, N., Yamaji, N., Rémus-Borel, W., Belzile, F., Ma, J. F., & Bélanger, R. R. (2012). Cloning, functional characterization and heterologous expression of TaLsi1, a wheat silicon transporter gene. *Plant Molecular Biology*, 79(1–2), 35–46. <https://doi.org/10.1007/s11103-012-9892-3>
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Naseer, S., Lee, Y., Lapierre, C., Franke, R., Nawrath, C., & Geldner, N. (2012). Casparian strip diffusion barrier in Arabidopsis is made of a lignin polymer without suberin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(25), 10101–10106. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205726109>
- Pérez, A., Saucedo, O., Iglesias, J., Wencomo, H. B., Reyes, F., Oquendo, G., & Milián, I. (2010). Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y Forrajes*, 33(1), 1–26. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942010000100001
- Rafi, M. M., Epstein, E., & Falk, R. H. (1997). Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Physiology*, 151(4), 497–501. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(97\)80017-X](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(97)80017-X)
- Raven, J. A. (1983). The transport and function of silicon in plants. *Biological Reviews*, 58(2), 179–207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185x.1983.tb00385.x>
- Ruiz, C.A.J., Medina, G.G, Flores, H.E., & Ramírez, O.G. (2013). Requerimientos agroecológicos de cultivos 2da Edición. Libro Técnico Núm. 3. *INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco*. México. 564 p. ISBN: 978-607-37-0188-4. <https://www.researchgate.net/publication/343047223>
- Ruiz, S. D. R., López, D. H. A., Ayala, H. D. D., Trejo, C., Mora, H. M. E., & Uscanga, M. E. (2022). Induction of tolerance to cryogenic protocols in *Solanum tuberosum* by

salicylic acid is mediated by enzymatic antioxidant activity and hydrogen peroxide. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 97(1), 86–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1949397>

SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2021a). *Mapa Agrícola de afectación por salinidad en México*. <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/mapa-agricola-de-afectacion-por-salinidad-en-mexico>

SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2021b). Sorgo grano. En *Escenario mensual de productos agroalimentarios* (pp. 1–2).

Sangster, A. G., Hodson, M. J., & Tubb, H. J. (2001). Chapter 5 Silicon deposition in higher plants. *Studies in Plant Science*, 8(C), 85–113. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80009-4](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80009-4)

Sauer, D., Saccone, L., Conley, D. J., Herrmann, L., & Sommer, M. (2006). Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. *Biogeochemistry*, 80(1), 89–108. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-5879-3>

Sergiev, I., Alexieva, V., & Karanov, E. (1997). Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 51, 121–24.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). Tomate rojo. En *Panorama alimentario* (p. 123). https://nube.siap.gob.mx/panorama_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). Tomate rojo. En *Panorama alimentario* (p. 2). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200635/Panorama_Agroalimentario_Tomate_Rojo_2016.pdf

Singh, A. (2022). Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management* 38(1): 39–67. <https://doi.org/10.1111/sum.12772>

Sergiev, I., Alexieva, V., & Karanov, E. (1997). Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*. 51(2), 121–24.

Serra, O., Hohn, C., Franke, R., Prat, S., Molinas, M., & Figueras, M. (2010). A feruloyl transferase involved in the biosynthesis of suberin and suberin-associated wax is required for maturation and sealing properties of potato periderm. *The Plant Journal*. 62(2), 277–90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04144.x>

Shabala, S. (2012). Plant stress physiology. En *Plant Stress Physiology* (CABI). <https://doi.org/10.5860/choice.50-2652>

- Soukup, M., Martinka, M., Bosnić, D., Čaplovičová, M., Elbaum, R., & Lux, A. (2017). Formation of silica aggregates in sorghum root endodermis is predetermined by cell wall architecture and development. *Annals of Botany*, 120(5), 739–753. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx060>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology* (3ra ed.). Sinauer Associates.
- Takahashi, E., Ma, J. F., & Miyake, Y. (1990). The possibility of silicon as an essential element for higher plants. *Comments of Agricultural and Food Chemistry*. 2(2), 99–102.
- Takeno, N. (2005). Atlas of Eh-pH diagrams Intercomparison of thermodynamic databases. *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Tokyo*, 419, 285. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Atlas+of+Eh-pH+diagrams+Intercomparison+of+thermodynamic+databases#0>
- Trejo, T.L.I., García, J.A., Escobar, S.H.F., Ramírez, O.S.M., Bello, B.J.J., Gómez, M.F.C. (2020). Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. *PeerJ* 8: e9224. <https://doi.org/10.7717/peerj.9224>
- Trejo, T.L.I., Gómez, T.L.F., Escobar, S.H.F., Gómez, M.F.C. (2022). The genetics of silicon accumulation in plants. *In Silicon and nano-silicon in environmental stress management and crop quality improvement: Progress and Prospects*. Etesami H, Al-Saeedi A, El-Ramady H, Fujita M, Pessaraki M, Hossain MA (Eds.). Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; pp. 67–75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91225-9.00011-X>
- Velázquez, J.C.V., Rincón, F., & Ruiz, N.T. (2020). Respuesta al estrés por salinidad de familias s₁ de dos poblaciones de maíz. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 7(1): e2355 <https://doi.org/10.19136/era.a7n1.2355>
- Villar, P.S., Ocaña, L., Peñuelas, J., Carrasco, I., Domínguez, S., & Renilla, I. (1997). Relaciones hídricas y potencial de formación de raíces en plántulas de *Pinus Halepensis* Mill. sometidas a diferentes niveles de endurecimiento por estrés hídrico. *Cuadernos de la S.E.C.F.* 4, 81–92.
- Williamson, B. J., Pastiroff, S., & Cressey, G. (2001). Piezoelectric properties of quartz and cristobalite airborne particulates as a cause of adverse health effects. *Atmospheric Environment*, 35(20), 3539–3542. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00121-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00121-2)
- Yin, L., Wang, S., Tanaka, K., Fujihara, S., Itai, A., Den, X., & Zhang, S. (2016). Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. *Plant Cell and Environment*, 39(2), 245–258. <https://doi.org/10.1111/pce.12521>

ANEXOS

Anexo A

Cuadro A1. Pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia en variables de crecimiento y fisiológicas de tomate.

Variable	Normalidad		Homogeneidad		Independencia
	W	P	F	P	
CE	0.74471	<.0001	41.796	<.0001	Aprobada
Agua repuesta	0.94961	<.0001	17.765	0.00049	Aprobada
Altura de planta	0.97173	0.6074	2.3494	0.5031	Aprobada
Diámetro tallo	0.96974	0.5321	0.86457	0.834	Aprobada
Área foliar	0.95726	0.5198	4.725	0.1931	Aprobada
Longitud de raíz	0.82894	0.00310	5.4144	0.1439	Aprobada
Volumen de raíz	0.94126	0.2778	2.6952	0.441	Aprobada
Hoja verdadera 3	0.98823	0.9813	3.9088	0.2715	Aprobada
Hoja verdadera 4	0.96184	0.3646	5.1912	0.1583	Aprobada
Hoja verdadera 5	0.95678	0.2732	3.6533	0.3014	Aprobada
Hoja verdadera 6	0.91542	0.0233	7.3359	0.06193	Aprobada
Hoja verdadera 7	0.92918	0.05238	9.445	0.02392	Aprobada
Hoja verdadera 8	0.91797	0.02709	7.0861	0.0692	Aprobada
Hoja verdadera 9	0.97878	0.8064	4.6755	0.1972	Aprobada
Hoja verdadera 10	0.97127	0.5946	5.2616	0.1536	Aprobada
No. de flores	0.94974	0.1664	2.8698	0.4121	Aprobada
Biomasa fresca hojas	0.94827	0.3692	3.7152	0.2939	Aprobada
Biomasa fresca peciolo (log)	0.97462	0.8635	8.0799	0.04439	Aprobada
Biomasa fresca frutos (log)	0.96672	0.7096	3.5519	0.3141	Aprobada
Biomasa fresca tallo	0.97519	0.8733	5.6067	0.1324	Aprobada
Biomasa fresca raíz	0.90594	0.0623	3.4106	0.3325	Aprobada
Biomasa seca hojas	0.92371	0.1168	6.9094	0.0748	Aprobada
Biomasa seca peciolo	0.94511	0.3251	5.0369	0.1691	Aprobada
Biomasa seca frutos	0.9579	0.5318	6.8955	0.0753	Aprobada
Biomasa seca tallo	0.91006	0.0742	2.8055	0.4226	Aprobada
Biomasa seca raíz	0.90613	0.0628	4.8655	0.1819	Aprobada
Conductancia estomática	0.72088	<0.0001	25.68	<0.0001	Aprobada
SPAD	0.88758	<0.0001	27.597	<0.0001	Aprobada
Raíz/vástago (log)	0.92488	0.1393	6.807	0.07831	Aprobada

Cuadro A2. Pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia en variables de crecimiento y fisiológicas de sorgo.

Variable	Normalidad		Homogeneidad		Independencia
	W	P	F	P	
CE	0.72798	<0.0001	52.665	<0.0001	Aprobada
Agua repuesta	0.95022	<0.0001	36.106	<0.0001	Aprobada
Altura de planta	0.97236	0.6057	5.0898	0.1653	Aprobada
Diámetro tallo	0.98252	0.8878	4.9579	0.1749	Aprobada
Área foliar (log)	0.93133	0.1638	1.6908	0.639	Aprobada
Longitud de raíz	0.94426	0.2882	0.16868	0.9825	Aprobada
Volumen de raíz(log)	0.94014	0.2412	7.3738	0.0608	Aprobada
No. de macollos	0.94498	0.1239	12.928	0.00479	Aprobada
Biomasa fresca hojas (log)	0.95421	0.4356	1.0665	0.7852	Aprobada
Biomasa fresca vaina	0.87599	0.015	10.443	0.0151	Aprobada
Biomasa fresca tallo principal	0.97887	0.9187	7.8109	0.05009	Aprobada
Biomasa fresca tallo macollos (log)	0.97101	0.7761	2.795	0.4243	Aprobada
Biomasa fresca raíz (log)	0.96019	0.5477	0.2996	0.9601	Aprobada
Biomasa seca hojas	0.97702	0.8901	2.7652	0.4293	Aprobada
Biomasa seca vaina (log)	0.97469	0.849	7.523	0.0569	Aprobada
Biomasa seca tallo principal (log)	0.96161	0.5765	0.3130	0.9576	Aprobada
Biomasa seca tallo macollos	0.89715	0.0364	4.9776	0.1734	Aprobada
Biomasa seca raíz (log)	0.97009	0.7568	0.47189	0.925	Aprobada
Conductancia estomática	0.86969	0.0004	14.142	0.0027	Aprobada
SPAD	0.98422	0.1745	1.0247	0.7953	Aprobada
Raíz/vástago	0.93572	0.1988	10.705	0.01343	Aprobada

Cuadro A3. Pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia en variables bioquímicas de tomate cv. El Cid F1.

Órgano	Variable	Normalidad		Homogeneidad		Independencia
		W	P	F	P	
Hojas (log)		0.93306	0.2725	0.68508	0.8767	Aprobada
Peciolo (log)		0.92547	0.2065	1.5507	0.6706	Aprobada
Fruto	Prolinas	0.83257	0.007628	16.93	0.0007305	Aprobada
Tallo		0.93303	0.2721	4.1804	0.2426	Aprobada
Raíz (log)		0.97785	0.9442	2.1324	0.5454	Aprobada
Hojas		0.97013	0.8408	1.3224	0.7238	Aprobada
Peciolo	Capacidad	0.97561	0.9193	7.7034	0.05256	Aprobada
Fruto	antioxidante	0.97596	0.9235	1.5994	0.6595	Aprobada
Tallo	(15 min)	0.95898	0.6433	2.9417	0.4007	Aprobada
Raíz (log)		0.93091	0.252	8.1999	0.04206	Aprobada
Hojas		0.96479	0.7489	1.3955	0.7066	Aprobada
Peciolo	Capacidad	0.96004	0.6624	5.4652	0.1407	Aprobada
Fruto	antioxidante	0.97308	0.8858	5.7455	0.1247	Aprobada
Tallo	(30 min)	0.95403	0.5562	1.855	0.603	Aprobada
Raíz (log)		0.93332	0.275	9.3415	0.02508	Aprobada
Hojas		0.95001	0.4898	1.2932	0.7308	Aprobada
Peciolo	Capacidad	0.97136	0.8601	5.5215	0.1374	Aprobada
Fruto	antioxidante	0.97172	0.8656	3.4138	0.3321	Aprobada
Tallo	(60 min)	0.96743	0.7954	2.3959	0.4944	Aprobada
Raíz (log)		0.86853	0.02583	11.684	0.008548	Aprobada
Hojas		0.95443	0.5629	4.0633	0.2547	Aprobada
Peciolo		0.94737	0.4492	1.2577	0.7392	Aprobada
Fruto	H ₂ O ₂	0.96891	0.8206	2.9451	0.4002	Aprobada
Tallo		0.96433	0.7404	5.3996	0.1448	Aprobada
Raíz		0.91592	0.145	3.0911	0.3778	Aprobada

Cuadro A4. Pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia en variables fisiológicas y bioquímicas de sorgo forrajero cv. Kikappo.

Órgano	Variable	Normalidad		Homogeneidad		Independencia
		W	P	F	P	
Hojas		0.93908	0.3379	4.8668	0.1818	Aprobada
Vaina (log)		0.75999	0.0008402	21.661	<0.0001	Aprobada
Tallo P (log)	Prolinas	0.98116	0.9721	0.75966	0.8591	Aprobada
Tallo M (log)		0.96333	0.7224	5.7271	0.1257	Aprobada
Raíz (log)		0.95664	0.6015	3.8066	0.2831	Aprobada
Hojas		0.93591	0.3019	21.609	<0.0001	Aprobada
Vaina	Capacidad antioxidante (15 min)	0.979	0.9552	1.0564	0.7876	Aprobada
Tallo P		0.98447	0.9892	4.0587	0.2552	Aprobada
Tallo M		0.93267	0.2687	2.2816	0.5161	Aprobada
Raíz		0.98275	0.9816	3.4205	0.3312	Aprobada
Hojas		0.87448	0.03187	19.788	<0.0001	Aprobada
Vaina	Capacidad antioxidante (30 min)	0.62162	<0.0001	42.918	<0.0001	Aprobada
Tallo P		0.96435	0.7409	3.569	0.3119	Aprobada
Tallo M		0.95178	0.5184	5.7148	0.1263	Aprobada
Raíz		0.97544	0.9172	5.9802	0.1126	Aprobada
Hojas		0.83187	0.007454	18.357	<0.0001	Aprobada
Vaina	Capacidad antioxidante (60 min)	0.96117	0.683	0.48938	0.9212	Aprobada
Tallo P		0.96576	0.7661	1.8509	0.6039	Aprobada
Tallo M		0.94245	0.3801	4.4889	0.2133	Aprobada
Raíz		0.98707	0.9961	6.3	0.09789	Aprobada
Hojas		0.886	0.04817	23.591	<0.0001	Aprobada
Vaina (log)	H ₂ O ₂	0.90373	0.09225	2.6131	0.4552	Aprobada
Tallo P		0.91797	0.1564	7.7854	0.05066	Aprobada
Tallo M (log)		0.95306	0.5397	6.1277	0.1056	Aprobada
Raíz		0.98221	0.9786	5.6444	0.1303	Aprobada

Cuadro A5. Pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de datos de la concentración nutrimental en tomate.

Órgano	Variable	Normalidad		Homogeneidad		Independencia
		W	P	F	P	
Hojas	Si	0.95361	0.5489	1.113	0.7739	Aprobada
Peciolo	Si	0.92448	0.1991	0.52275	0.9139	Aprobada
1er racimo	Si	0.86092	0.01981	2.5948	0.4584	Aprobada
Raíz	Si (log)	0.91242	0.1273	2.728	0.4355	Aprobada
Tallo	Si	0.9038	0.09249	5.1965	0.158	Aprobada
Hojas	Cl	0.9547	0.5676	2.6027	0.457	Aprobada
Peciolo	Cl (log)	0.95994	0.6606	4.5988	0.2036	Aprobada
1er racimo	Cl	0.97415	0.949	1.0073	0.6043	Aprobada
Raíz	Cl (log)	0.94393	0.4	2.1509	0.5417	Aprobada
Tallo	Cl	0.95	0.4897	1.5762	0.6648	Aprobada
Hojas	Na	0.93562	0.2988	12.329	0.006337	Aprobada
Peciolo	Na (log)	0.90427	0.09409	1.4263	0.6994	Aprobada
1er racimo	Na (log)	0.88851	0.05276	3.9436	0.2676	Aprobada
Raíz	Na	0.93963	0.3445	7.7997	0.05034	Aprobada
Tallo	Na (log)	0.96014	0.6643	2.7739	0.4278	Aprobada
Hojas	N	0.94001	0.3491	12.776	0.005146	Aprobada
	P	0.93624	0.3055	5.5212	0.1374	Aprobada
	K	0.94486	0.4129	5.886	0.1173	Aprobada
	Ca	0.96237	0.705	3.1113	0.3748	Aprobada
	Mg	0.9327	0.2689	1.2523	0.7405	Aprobada
	S	0.92717	0.2198	0.60998	0.8941	Aprobada
	Fe	0.94887	0.4721	10.362	0.01572	Aprobada
	Cu	0.93628	0.3059	1.5295	0.6755	Aprobada
	Zn (log)	0.90599	0.1003	5.178	0.1592	Aprobada
	Mn	0.90424	0.09398	7.4146	0.05979	Aprobada
B	0.97553	0.9183	5.1093	0.164	Aprobada	
Peciolo	N	0.96653	0.7798	3.0319	0.3867	Aprobada
	P	0.96779	0.8017	12.563	0.005684	Aprobada
	K	0.98044	0.967	6.2314	0.1009	Aprobada
	Ca	0.96618	0.7736	1.9799	0.5766	Aprobada
	Mg	0.94912	0.4759	1.9886	0.5748	Aprobada
	S	0.95459	0.5656	5.7476	0.1246	Aprobada
	Fe	0.94402	0.4013	7.7569	0.05131	Aprobada
	Cu	0.96978	0.835	2.673	0.4448	Aprobada
	Zn	0.93513	0.2935	5.8575	0.1188	Aprobada
	Mn	0.93023	0.2459	9.8758	0.01965	Aprobada
B	0.97476	0.9085	3.8611	0.2769	Aprobada	

Órgano	Variable	Normalidad		Homogeneidad		Independencia
		W	P	F	P	
1er racimo	N	0.94728	0.4479	2.3154	0.5096	Aprobada
	P	0.96189	0.6961	0.56049	0.9054	Aprobada
	K	0.94664	0.4384	1.5186	0.678	Aprobada
	Ca	0.91958	0.1661	1.2569	0.7394	Aprobada
	Mg	0.94394	0.4001	0.56919	0.9034	Aprobada
	S	0.91851	0.1596	5.1694	0.1598	Aprobada
	Fe (log)	0.97783	0.944	10.321	0.01603	Aprobada
	Cu (log)	0.96829	0.8102	2.1815	0.5356	Aprobada
	Zn	0.9356	0.298	6.682	0.08276	Aprobada
	Mn	0.92616	0.2118	0.8848	0.8291	Aprobada
	B (log)	0.87392	0.03124	8.9039	0.0306	Aprobada
Raíz	N	0.96502	0.753	3.5793	0.3106	Aprobada
	P	0.81477	0.004307	22.72	4.62e-05	Aprobada
	K	0.95341	0.5456	6.3925	0.094	Aprobada
	Ca (log)	0.95813	0.628	7.5946	0.05518	Aprobada
	Mg	0.91991	0.1682	3.9054	0.2719	Aprobada
	S	0.95946	0.6521	1.2513	0.7407	Aprobada
	Fe	0.97652	0.93	3.1133	0.3745	Aprobada
	Cu	0.84194	0.01039	10.611	0.01402	Aprobada
	Zn	0.93089	0.2518	1.6523	0.6476	Aprobada
	Mn	0.96965	0.8329	2.1315	0.5456	Aprobada
B	0.91867	0.1605	1.7375	0.6286	Aprobada	
Tallo	N	0.96712	0.79	7.1546	0.06713	Aprobada
	P	0.97216	0.8722	1.4283	0.6989	Aprobada
	K	0.91025	0.1174	6.0608	0.1087	Aprobada
	Ca	0.92316	0.1896	7.0525	0.07024	Aprobada
	Mg	0.91584	0.1445	2.1041	0.5511	Aprobada
	S	0.97619	0.9262	6.319	0.09708	Aprobada
	Fe	0.97111	0.8562	1.2932	0.7307	Aprobada
	Cu	0.88559	0.04746	7.7923	0.0505	Aprobada
	Zn	0.95956	0.6538	3.7687	0.2876	Aprobada
	Mn	0.98764	0.997	4.2022	0.2404	Aprobada
B	0.95917	0.6467	4.7365	0.1921	Aprobada	

(log): se usaron datos logarítmicos que cumplieran con las pruebas. Pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk ($\alpha=0.05$). Prueba de homogeneidad de varianzas de Bartlett ($\alpha=0.05$).

Cuadro A6. Pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de datos de la concentración nutrimental en sorgo.

Órgano	Variable	Normalidad		Homogeneidad		Independencia
		W	P	F	P	
Hojas	Si (log)	0.98289	0.9823	7.2711	0.06374	Aprobada
Raíz	Si	0.94771	0.4543	3.1067	0.3755	Aprobada
Tallo M	Si	0.95523	0.5768	1.6814	0.6411	Aprobada
Tallo P	Si	0.9041	0.0935	12.879	0.004906	Aprobada
Vaina P	Si	0.96743	0.7955	5.2374	0.1552	Aprobada
Hojas	Cl	0.96464	0.7461	1.6378	0.6508	Aprobada
Raíz	Cl	0.94873	0.4699	1.6312	0.6523	Aprobada
Tallo M	Cl (log)	0.92958	0.2401	3.1955	0.3625	Aprobada
Tallo P	Cl	0.86459	0.0225	9.7421	0.02089	Aprobada
Vaina P	Cl	0.78353	0.00166	19.101	0.0002606	Aprobada
Hojas	Na (log)	0.92012	0.1694	2.312	0.5102	Aprobada
Raíz	Na (log)	0.97379	0.8957	2.7684	0.4287	Aprobada
Tallo M	Na	0.94931	0.4789	10.562	0.01434	Aprobada
Tallo P	Na (log)	0.92954	0.2398	4.9508	0.1754	Aprobada
Vaina P	Na (log)	0.97409	0.8997	4.3139	0.2295	Aprobada
Hojas	N	0.94414	0.4029	1.7468	0.6266	Aprobada
	P	0.969	0.8221	2.7386	0.4337	Aprobada
	K (log)	0.95659	0.6006	7.8035	0.05025	Aprobada
	Ca	0.98304	0.9831	3.1858	0.3639	Aprobada
	Mg	0.94919	0.4769	1.3512	0.717	Aprobada
	S	0.9329	0.2709	3.5457	0.3149	Aprobada
	Fe	0.9439	0.3996	2.5134	0.4729	Aprobada
	Cu (log)	0.90683	0.1035	4.397	0.2217	Aprobada
	Zn	0.9121	0.1258	1.7985	0.6153	Aprobada
	Mn	0.99387	1	6.5295	0.08851	Aprobada
	B	0.98149	0.9743	9.156	0.02729	Aprobada
	Raíz	N	0.97709	0.9363	2.8006	0.4234
P		0.97398	0.8982	7.1681	0.06673	Aprobada
K		0.965	0.7526	9.7959	0.02038	Aprobada
Ca		0.95865	0.6374	10.462	0.01502	Aprobada
Mg		0.97033	0.844	8.0178	0.04564	Aprobada
S		0.95906	0.6447	3.4809	0.3233	Aprobada
Fe		0.95657	0.6002	0.42224	0.9356	Aprobada
Cu		0.96399	0.7344	4.7871	0.1881	Aprobada
Zn		0.93579	0.3005	1.1032	0.7763	Aprobada
Mn		0.90659	0.1025	1.0096	0.7989	Aprobada
B	0.96525	0.757	5.667	0.129	Aprobada	
Tallo M	N	0.93597	0.3025	3.2739	0.3513	Aprobada
	P	0.9361	0.304	2.8517	0.4151	Aprobada
	K	0.96584	0.7676	1.9236	0.5884	Aprobada

Órgano	Variable	Normalidad		Homogeneidad		Independencia
		W	P	F	P	
Tallo M	Ca	0.90089	0.08304	3.5264	0.3173	Aprobada
	Mg	0.94972	0.4853	4.8714	0.1815	Aprobada
	S	0.92208	0.1822	3.9749	0.2642	Aprobada
	Fe	0.92094	0.1747	12.081	0.007111	Aprobada
	Cu	0.89145	0.05874	5.7423	0.1248	Aprobada
	Zn	0.97162	0.8641	2.7656	0.4292	Aprobada
	Mn	0.90184	0.08602	1.5446	0.672	Aprobada
	B	0.97732	0.9388	1.1526	0.7644	Aprobada
Tallo P	N	0.96359	0.7272	12.459	0.005965	Aprobada
	P	0.97047	0.8462	2.8187	0.4204	Aprobada
	K	0.967	0.788	4.3021	0.2306	Aprobada
	Ca	0.96195	0.6972	2.7304	0.4351	Aprobada
	Mg (log)	0.90097	0.08331	7.2589	0.06409	Aprobada
	S	0.96474	0.748	3.8218	0.2814	Aprobada
	Fe	0.90376	0.09234	3.699	0.2958	Aprobada
	Cu (log)	0.89351	0.06332	5.6467	0.1301	Aprobada
	Zn	0.89162	0.05909	3.1689	0.3663	Aprobada
	Mn (log)	0.89062	0.05697	3.6246	0.305	Aprobada
B	0.8886	0.05294	1.7218	0.6321	Aprobada	
Vaina P	N	0.94696	0.443	1.8494	0.6043	Aprobada
	P	0.92844	0.2303	3.9374	0.2683	Aprobada
	K	0.8745	0.03189	0.89108	0.8276	Aprobada
	Ca	0.98229	0.9791	5.9905	0.1121	Aprobada
	Mg	0.9211	0.1757	1.6557	0.6468	Aprobada
	S	0.92529	0.2051	3.9476	0.2672	Aprobada
	Fe	0.72825	0.0003517	35.946	<.0001	Aprobada
	Cu (log)	0.92945	0.2389	2.902	0.407	Aprobada
	Zn	0.9365	0.3083	0.95023	0.8133	Aprobada
	Mn	0.97381	0.8959	0.75616	0.8599	Aprobada
B	0.9442	0.4036	3.0279	0.3873	Aprobada	

(log): se usaron datos logarítmicos que cumplieran con las pruebas; P: principal; M: macollos. Pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk ($\alpha=0.05$). Prueba de homogeneidad de varianzas de Bartlett ($\alpha=0.05$).

Anexo B

Cuadro B1. Resultados de las pruebas Kruskal-Wallis ($P \leq 0.05$) en variables no paramétricas de tomate.

Órgano	Variable	Chi cuadrada (χ^2)	P
1er racimo	Silicio	12.728	0.005263
Hojas	Sodio	14.118	0.002749
Hojas	Nitrógeno	13.678	0.003378
Hojas	Hierro	12.794	0.005104
Peciolo	Fósforo	14.118	0.002749
Peciolo	Manganeso	14.118	0.002749
1er racimo	Hierro	12.11	0.007015
1er racimo	Boro	12.904	0.004848
Raíz	Fósforo	12.728	0.005263
Raíz	Cobre	14.138	0.002723
Tallo	Cobre	13.5	0.003671
	CE	13.047	0.004536
	Agua repuesta	60.111	<0.0001
	Longitud raíz	5.5744	0.1343
	Hoja verdadera 6	20.59	0.00012
	Hoja verdadera 7	21.346	<0.0001
	Hoja verdadera 8	20.706	<0.0001
	Conductancia estomática	4.6691	0.1977
	SPAD	37.771	<0.0001
Fruto	Prolinas	12.728	0.005263

Cuadro B2. Resultados de las pruebas Kruskal-Wallis ($P \leq 0.05$) en variables no paramétricas de sorgo.

Órgano	Variable	Chi cuadrada (χ^2)	P
Tallo principal	Silicio	10.699	0.013470
Tallo principal	Cloruros	6.5763	0.086700
Vaina principal	Cloruros	1.3440	0.718700
Tallo macollos	Sodio	13.059	0.004511
Hojas	Boro	13.787	0.003210
Raíz	Potasio	14.118	0.002749
Raíz	Calcio	11.669	0.008607
Raíz	Magnesio	11.735	0.008347
Tallo macollos	Hierro	0.86029	0.835000
Tallo principal	Nitrógeno	12.793	0.005106
Vaina principal	Potasio	5.0294	0.169700
Vaina principal	Hierro	9.2868	0.025710
	CE	10.79	0.01292
	Agua repuesta	58.513	<0.0001
	No. macollos	7.1401	0.06756
	Biomasa fresca vaina	8.6119	0.03492
	Biomasa seca tallo macollos	9.381	0.02463
B	Conductancia estomática	6.5903	0.08617
	Raíz/vástago	3.6024	0.3077
Vaina	Prolinas	13.172	0.004279
Vaina	CAT (30 min)	12.482	0.005903
Hojas	CAT (15 min)	8.9338	0.03018
Hojas	CAT (30 min)	9.7257	0.02105
Hojas	CAT (60 min)	8.3505	0.0393
Hojas	H ₂ O ₂	14.118	0.002749