



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



**SELECCIÓN DE PORTAINJERTOS PARA ENFRENTAR EL ESTRÉS
POR SALINIDAD EN JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta

JUAN RAMOS JIMÉNEZ

Bajo la dirección del

DR. JUAN ENRIQUE RODRÍGUEZ PÉREZ

Chapingo, México, junio de 2024



APROBADA



**SELECCIÓN DE PORTAINJERTOS PARA ENFRENTAR EL ESTRÉS POR
SALINIDAD EN JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)**

Tesis realizada por **JUAN RAMOS JIMÉNEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

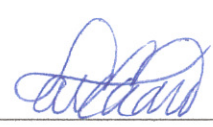
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



DR. JUAN ENRIQUE RODRÍGUEZ PÉREZ

ASESOR:



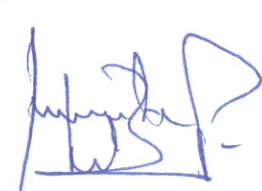
DR. JAIME SAHAGÚN CASTELLANOS

ASESOR:



DR. ALEJANDRO FACUNDO BARRIENTOS PRIEGO

ASESOR:



DR. JOEL PINEDA PINEDA

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	v
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DATOS BIOGRÁFICOS	iv
RESUMEN GENERAL	v
GENERAL ABSTRACT	vi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA GENERAL	4
2.1 Importancia del jitomate	4
2.2 Efecto de la salinidad en las plantas	4
2.3 Mecanismos de tolerancia a la salinidad	6
2.4 Tolerancia a salinidad de injertos de jitomate	7
2.5 Absorción nutrimental.....	8
2.6 Injertos.....	9
2.7 LITERATURA CITADA	11
3. EVALUACIÓN DE PORTAINJERTOS DE JITOMATE EN PLANTULA BAJO CONDICIONES DE ALTA SALINIDAD	18
RESUMEN	18
ABSTRACT.....	19
3.1 INTRODUCCIÓN.....	20
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.2.1. Sitio experimental	20
3.2.2 Genotipos evaluados	21
3.2.3 Manejo experimental	21
3.2.4 Concentraciones de Cloruro de Sodio	21
3.2.5 Unidad y diseño experimental	22
3.2.6 Caracteres evaluados.....	22
3.2.7 Análisis estadísticos	23

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
3.4 CONCLUSIONES.....	27
3.5 LITERATURA CITADA	27
4. SELECCIÓN DE PORTAINJERTOS DE JITOMATE TOLERANTES A SALINIDAD EN ETAPA VEGETATIVA.....	29
RESUMEN	29
ABSTRACT.....	30
4.1 INTRODUCCION.....	31
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS	32
4.2.1 Localización.....	32
4.2.2 Material vegetal.....	32
4.2.3 Proceso de injertación.....	33
4.2.4 Trasplante.....	34
4.2.5 Concentraciones de Cloruro de Sodio	34
4.2.6 Unidad y diseño experimental	34
4.2.7 Caracteres evaluados.....	34
4.2.7.1 Características morfológicas	34
4.2.7.2 Concentraciones nutrimentales.....	35
4.2.8 Análisis estadístico.....	37
4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.3.1 Características morfológicas	38
4.3.2 Concentraciones nutrimentales	42
4.4 CONCLUSIONES.....	61
4.5 LITERATURA CITADA	62
5. CARACTERISTICAS DE XILEMA EN INJERTOS DE JITOMATE BAJO ESTRÉS SALINO	67
RESUMEN	67
ABSTRACT.....	68
5.1 INTRODUCCIÓN.....	69
5.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	70

5.2.1 Localización.....	70
5.2.2 Portainjertos y vástagos empleados.....	70
5.2.3 Diseño de tratamientos.....	71
5.2.4 Proceso de injertación.....	71
5.2.5 Trasplante.....	72
5.2.6 Concentraciones de Cloruro de Sodio	72
5.2.7 Obtención de cortes anatómicos	73
5.2.8 Unidad y diseño experimental	73
5.2.9 Caracteres evaluados.....	74
5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
5.4 CONCLUSIONES.....	79
5.5 LITERATURA CITADA	80
CONCLUSIÓN GENERAL	81

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Concentración nutrimental de hojas jóvenes de jitomate.	8
Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza de siete caracteres evaluados en plántula de nueve genotipos de jitomate con 0 y 175 mM de NaCl en solución nutritiva.	23
Cuadro 3. Comparación de medias y porcentaje de reducción de caracteres evaluados del factor concentración.	24
Cuadro 4. Comparaciones de medias de la interacción GENxCON de 9 genotipos de jitomate expuestos a dos concentraciones de NaCl. Las comparaciones se realizaron entre concentraciones dentro de cada genotipo.	26
Cuadro 5. Análisis de varianza de seis caracteres evaluados en plantas sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas de jitomate en condiciones de 0 y 70 mM de NaCl.	38
Cuadro 6. Comparación de medias y porcentaje de reducción de variables morfológicas por concentración de NaCl con respecto al testigo en cuatro portainjertos y El Cid F1 sin injertar, autoinjertos y heteroinjertos de jitomate.	39
Cuadro 7. Comparación de medias de la interacción GENxCON de plantas sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas de jitomate bajo dos concentraciones salinas.	40
Cuadro 8. Análisis de varianza de la concentración nutrimental en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas bajo condiciones de salinidad de 0 y 70 mM.	43
Cuadro 9. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de nitrógeno en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	44
Cuadro 10. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de fósforo en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	45
Cuadro 11. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de potasio en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	47
Cuadro 12. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de calcio en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	49

Cuadro 13. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de magnesio en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	50
Cuadro 14. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de hierro en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	51
Cuadro 15. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de cloro en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	52
Cuadro 16. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de sodio en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	54
Cuadro 17. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de azufre en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	55
Cuadro 18. Contrastes ortogonales del efecto por cloruro de sodio sobre la concentración nutrimental en plantas sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas por concentración y órgano.	56
Cuadro 19. Contrastes ortogonales del efecto por cloruro de sodio sobre la concentración nutrimental en grupos plantas sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	57
Cuadro 20. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la relación K/Na en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.	59
Cuadro 21. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la relación Ca/Na en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas	60
Cuadro 22. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la relación Mg/Na en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas	61
Cuadro 23. Variación anatómica por la interacción Posición x Concentración de cuatro portainjertos de jitomate, autoinjertos y heteroinjertos con El Cid F1, bajo estrés salino.	74
Cuadro 24. Variación anatómica mediante la interacción genotipo x concentración en portainjertos de jitomate, autoinjertos y heteroinjertos con El Cid F1, bajo estrés salino.	75

Cuadro 25. Variación anatómica por la interacción del genotipo x posición x concentración de 4 portainjertos de jitomate, autoinjertos y heteroinjertos con El Cid F1 bajo condiciones de salinidad.	77
Cuadro 26. Variación anatómica por la Interacción del genotipo x posición x concentración de 4 portainjertos de jitomate, autoinjertos y heteroinjertos con El Cid F1 bajo condiciones de salinidad.	78

DEDICATORIA

Con todo mi amor y admiración a mi madre, Martha Jiménez Ixtla quien con fuerza y valentía ha guiado mi camino. Sin ella, esto no hubiera sido posible.

Con mucho amor y cariño a mi esposa, Tabita Queren Pérez Reyes, por ser mi apoyo constante e incondicional, en pocas palabras, por ser todo lo que necesito.

A mi hijo Santiago Ramos Pérez, por darle color a cada uno de mis días. Siempre tendrás un amigo y acompañante en este viaje.

Con cariño y respeto a mi padre, Benito Ramos Flores por su apoyo y comprensión.

A mis hermanos: Antonio, Rosario y Jesús, por su apoyo, amor y cariño.

A mi cuñado Martin Moreno González, por ser otro hermano más.

A mis sobrinos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida, la salud y por todas y cada una de las situaciones que me han traído a este punto de mi vida.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología por el financiamiento proporcionado para realizar esta investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo, al Instituto de Horticultura y departamento de Fitotecnia por abrirme las puertas para poder continuar con mi formación académica y profesional.

Al honorable comité asesor: Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez, Dr. Jaime Sahagún Castellanos, Dr. Alejandro Facundo Barrientos Priego y Dr. Joel Pineda Pineda, por sus conocimientos, tiempo y apoyo en esta investigación.

Al C. Jorge Luis Sánchez Galicia, por el apoyo en los trabajos de invernadero, por su amistad, consejos y enseñanzas.

A la C. María Haydé Tellez Sánchez y Lic. Berenice Hernández Sánchez por su apoyo y asesoría en laboratorio para las determinaciones nutrimentales.

A mis amigos: Efrén Cintora, Ismael Hernández, Placido Facundo, Ariadna Goreti López, Alma Aurora Deanda, Ana Elizabeth Paredes, Elin Pérez, Nancy Elena González, Brayan Alexis Domínguez, Romi Sinahí Fonseca, Claudia Reyes y Mercedes Gómez, por los consejos y apoyo en la obtención de los datos.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Juan Ramos Jiménez
Fecha de nacimiento	Diciembre 13 1995
Lugar de nacimiento	Ixcatla, Ixhuatlán del café, Veracruz.
CURP	RAJJ131295HVZMMN02
Cédula profesional	303318

Desarrollo académico

Licenciatura	Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia.
--------------	--

SELECCIÓN DE PORTAINJERTOS PARA ENFRENTAR EL ESTRÉS POR SALINIDAD EN JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)

RESUMEN GENERAL

El jitomate es la hortaliza de mayor importancia económica a nivel mundial, sin embargo, disminuye su productividad y calidad de fruto en condiciones de salinidad del suelo. Una alternativa eficaz para enfrentar este factor adverso es el uso de portainjertos tolerantes. Los objetivos de la presente investigación fueron seleccionar portainjertos de jitomate tolerantes a altas condiciones de NaCl en la solución nutritiva (SN) mediante el estudio de la variación de caracteres morfológicos y fisiológicos. Para ello, se evaluó: A) plántulas de tres híbridos, una línea silvestre y cinco líneas derivadas de una cruce de *Solanum lycopersicum* x *Solanum habrochaites* durante nueve días en un sistema de balsa flotante con 175 mM de NaCl en la SN. B) Tres genotipos con mayor tolerancia en estado de plántula y un portainjerto comercial fueron autoinjertados e injertados con el híbrido El Cid y sometidos durante 24 días a la concentración de 70 mM de NaCl en la SN para determinar los cambios morfológicos y nutrimentales en hojas y tallos. C) Se estudió la variación anatómica de vasos de xilema del tallo en la zona cercana del sitio de unión del injerto, expuestos a condiciones de salinidad (70 mM) durante 24 días y en ausencia de ella. Los resultados indicaron que: A) En estado de plántula, tres genotipos (103, 154 y 155) sobresalieron al mantener en condiciones de salinidad mayor expresión de materia seca acumulada de raíz y total; y mayor longitud de raíz. B) En plantas injertadas, la longitud y materia seca de raíz fueron menos afectadas por la salinidad (70 Mm) con reducciones de 6 y 7.9 %, respectivamente. Además, disminuyó la concentración de K, Mg y S. En contraste, el Ca incrementó y no hubo efecto significativo sobre el N. El heteroinjerto Cid/155 tuvo las relaciones más altas de K/Na, Ca/Na y Mg/Na, lo que muestra mayor selectividad de Na. C) El portainjerto 155 incrementó el área de vasos del xilema en el injerto ante la condición salina. Los portainjertos con mayor eficiencia para soportar excesos de NaCl evitan disminuciones drásticas en la acumulación de materia seca, especialmente de la raíz; muestran mayor selectividad de NaCl, lo que disminuye su transporte hacia el vástago y permite mayores concentraciones relativas de K, Ca y Mg; y promueve el incremento de frecuencia y áreas de vasos de xilema en el vástago.

Palabras clave: Cortes anatómicos, injerto, NaCl, nutrimentos, xilema, frecuencia de vasos

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Juan Ramos Jiménez.

Director de la tesis: Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez.

SELECTION OF ROOTSTOCKS TO FACE SALINITY STRESS IN TOMATO (*Solanum lycopersicum* L.)

GENERAL ABSTRACT

Tomato is the most economically important vegetable worldwide; however, its productivity and fruit quality decrease under soil salinity conditions. An effective alternative to address this adverse factor is the use of tolerant rootstocks. The objectives of this research were to select tomato rootstocks tolerant to high NaCl conditions in the nutrient solution (NS) by studying the variation of morphological and physiological characters. To achieve this, the following were evaluated: A) seedlings of three hybrids, a wild line, and five lines derived from a cross of *Solanum lycopersicum* x *Solanum habrochaites* for nine days in a floating raft system with 175 mM NaCl in the NS. B) Three genotypes with greater seedling tolerance and a commercial rootstock were self-grafted and grafted with the El Cid hybrid and subjected for 24 days to a concentration of 70 mM NaCl in the NS to determine morphological and nutritional changes in leaves and stems. C) The anatomical variation of xylem vessels in the stem near the graft union site was studied under saline conditions (150 mM) for 24 days and in its absence. The results indicated that: A) In the seedling stage, three genotypes (103, 154, and 155) stood out by maintaining higher expression of accumulated root and total dry matter under salinity conditions, as well as longer root length. B) In grafted plants, root length and dry matter were less affected by salinity (70 mM) with reductions of 6 and 7.9%, respectively. Additionally, the concentrations of K, Mg, and S decreased. In contrast, Ca increased, and there was no significant effect on N. The heterograft Cid/155 had the highest ratios of K/Na, Ca/Na, and Mg/Na, indicating greater Na selectivity. C) Rootstock 155 increased the xylem vessel area in the graft under saline condition. Rootstocks with higher efficiency to withstand NaCl excesses prevent drastic decreases in dry matter accumulation, especially in the root; show greater selectivity for NaCl, reducing its transport to the shoot and allowing higher relative concentrations of K, Ca, and Mg; and promote the increase in frequency and areas of xylem vessels in the shoot.

Keywords: anatomical sections, graft, NaCl, nutrients, xylem, vessel frequency.

Thesis of Master of Science in Horticulture, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Juan Ramos Jiménez.

Advisor: Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

A nivel mundial existen aproximadamente 340 millones de hectáreas agrícolas de riego, de las cuales 20 % están afectadas por salinidad en distinto grado (Palacios y Pedraza, 2015). por otra parte, el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) al ser la hortaliza de mayor importancia económica a nivel mundial (Al-deeb et al., 2022) y la segunda con mayor extensión cultivada, principalmente en condiciones de riego, uno de los factores al que se enfrenta frecuentemente es la salinidad de suelos y/o agua (Singh et al., 2020).

En México, la agricultura bajo riego ocurre en 9.23 millones de hectáreas, de las cuales 40 % están afectadas por salinidad (Nikolskii-Gavrilov et al., 2015). Al ser el octavo productor, primer exportador mundial de jitomate y la segunda hortaliza con mayor extensión cultivable del país (47,800 ha), también se enfrentará con alta probabilidad a problemas de salinidad (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023).

La exposición a la salinidad es uno de los principales factores de estrés abiótico que afectan severamente el crecimiento, metabolismo, absorción, transporte, asimilación y distribución de nutrientes de las plantas (Julkowska et al., 2017). En soluciones nutritivas con conductividad eléctrica superior a $4.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ (Munns & Tester, 2008), se inhibe el crecimiento debido a que las plantas utilizan sus fotoasimilados para activar mecanismos de defensa como la producción de diversas proteínas del sistema antioxidante y la retención o exclusión de los iones Na^+ y Cl^- para superar la condición de estrés salino (Liu et al., 2016; De la Torre-González et al., 2018).

El daño por salinidad es atribuido principalmente a concentraciones altas de Na^+ y Cl^- en las hojas de las plantas, lo que genera desbalances nutrimentales de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; así como la reducción del crecimiento y productividad de la planta (Di Gioia et al., 2013; Rahman et al., 2016). La respuesta de los cultivos a la

salinidad varía de acuerdo con la etapa fenológica, intensidad y tiempo de exposición a dicha condición (Ruiz et al., 2014).

La identificación de cultivares tolerantes a salinidad, al ser un carácter complejo, requiere del estudio extenso de respuestas morfológicas, fisiológicas y de expresión genética bajo esta condición (Rothan, Diouf & Causse, 2019).

Un método eficaz para reducir el estrés salino en el cultivo de tomate es el uso de portainjertos tolerantes (Zhang et al., 2019) a patógenos del suelo (Cui et al., 2018) y al estrés abiótico (Acosta-Motos et al., 2017), al conferir a las plantas un sistema radical vigoroso que, además, incrementa la absorción de minerales y agua (Huang et al., 2016).

Debido a la posibilidad de que el uso de portainjertos impacte en forma negativa en el rendimiento, aún en ausencia del patógeno o estrés abiótico (Louws et al., 2010), se requiere del estudio de diversas alternativas; entre ellas se encuentra el uso de especies silvestres *Solanum chilense*, *S. peruvianum*, *S. pennellii*, *S. cheesmanii*, *S. pimpinellifolium* y *S. habrochaites*, emparentadas con *Solanum lycopersicum* L., las cuales poseen tolerancia a salinidad (Liedl et al., 2013), o bien el de cruza interespecíficas, situación observada comercialmente.

OBJETIVO GENERAL

Seleccionar portainjertos de jitomate con tolerancia a altas concentraciones de sales que garanticen el adecuado crecimiento y desarrollo del vástago.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cl, Na y S, en portainjertos tolerantes y susceptibles a salinidad; así como en el vástago de plantas de jitomate sometidas a concentraciones altas de sal en la solución nutritiva.

Verificar las modificaciones de xilema en la zona cercana al punto de unión del injerto (vástago y portainjerto) y su relación con la posible tolerancia a concentraciones altas de sal.

2. REVISIÓN DE LITERATURA GENERAL

2.1 Importancia del jitomate

El jitomate es una de las hortalizas de mayor importancia a nivel mundial, con producción anual cercana a 190 millones de toneladas y superficie cosechada de poco más de 5 millones de hectáreas (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022). México es el mayor exportador de jitomate del mundo; por lo que 2022 se generaron US\$ 2 millones 160 mil dólares por concepto de divisas. En el mismo año, el jitomate aportó el 21.6 % de la producción nacional de hortalizas, con 48 mil 042 hectáreas sembradas y producción de 3,462,000 toneladas, lo que colocó a México como el octavo productor mundial de este cultivo (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023).

En México, el jitomate se utiliza en amplia variedad de platillos tradicionales como salsas, guisos, ensaladas, y más, es una fuente importante de nutrientes como vitamina C, vitamina K, calcio, potasio y antioxidantes; además, su producción y comercialización genera miles de empleos e ingresos a nivel nacional, principalmente en los estados de: Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco, Baja California Sur, Zacatecas, Morelos, Puebla, México y Sonora, que en 2022 aportaron más del 70% de la producción de jitomate del país (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023).

2.2 Efecto de la salinidad en las plantas

La salinidad es la presencia de sales solubles en agua y suelo, en el mundo se estima que alrededor de 20 % de los terrenos agrícolas son afectados por esta condición (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020). Un suelo se considera salino cuando presenta conductividad eléctrica superior a $4.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, estas condiciones limitan la actividad microbiana del suelo y la

asimilación de nutrientes por las plantas, lo que causa efectos negativos en el ecosistema, biodiversidad del suelo, producción agrícola y en la economía (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021).

El estrés abiótico se define como el efecto negativo de factores sin vida sobre organismos vivos en un ambiente específico (Rajaniemi & Barrett, 2018); de estos, la salinización del agua y suelo es el principal estrés abiótico del cultivo de jitomate, al limitar la producción de fruto y demeritar su calidad, causado principalmente por la aplicación excesiva de fertilizantes y el uso de aguas de riego de mala calidad (Boari et al., 2016; Rivera, Moya & O'Brien, 2022).

El estrés salino provocado por la alta concentración de iones Na^+ y Cl^- afecta principalmente en dos modalidades: provoca estrés osmótico al disminuir la capacidad de las raíces para la absorción de agua debido a la acumulación de altas concentraciones de solutos en la zona radical (Yang & Guo, 2017), y el desequilibrio iónico en las células, atribuido a la toxicidad provocada por el alto contenido de Na^+ y Cl^- en los órganos de las plantas (Giuffrida et al., 2013); finalmente, desencadena diversos tipos de estrés como las anomalías metabólicas y el estrés oxidativo (Zhong et al. 2020).

El principal órgano que se enfrenta al estrés salino es la raíz, que es afectada en su morfología, principalmente la longitud de la raíz primaria, y el número y densidad de las raíces laterales, de manera que se reduce su crecimiento (Xiong et al., 2018). Además, las plantas disminuyen las concentraciones de K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} y NO_3^- , lo que demerita su crecimiento y desarrollo atribuido al cierre de estomas, que disminuye severamente la capacidad fotosintética y absorción de CO_2 , lo que finalmente reduce la productividad en los cultivos y ocasiona pérdidas económicas (Roychoudhury, Paul & Basu, 2013; Yang & Guo, 2018).

Los efectos de la salinidad en el vástago de la planta se reflejan en el acortamiento de los entrenudos, reducción del contenido de clorofila y del número de hojas, flores y frutos por la inhibición de la división celular; esto es debido a que la energía producida en la fotosíntesis se destina a contrarrestar el estrés, en lugar de destinarse al desarrollo y crecimiento (Wu & Li, 2019; Yang et al.,

2022), lo que conlleva a una reducción de la acumulación de materia fresca y seca de la parte aérea y radical (Leiva-Ampuero et al., 2020; Ruiz et al., 2014). Consecuentemente, las tasas de producción de biomasa y crecimiento son las más sensibles a la salinidad (Al-Harbi, Hejazi & Al-Omran, 2016).

En contraste, el estrés salino moderado puede mejorar la calidad de la fruta al incrementar la concentración de sólidos solubles, ácido glutámico, carotenoides y tocoferol (Massaretto et al., 2018).

Las especies tolerantes a salinidad mantienen una tasa de crecimiento constante ante este estrés, al poseer mecanismos de protección como el incremento en la actividad antioxidante (Alves et. al., 2021; Murshed, Lopez-Lauri & Sallanon, 2014) a través de varios ajustes fisiológicos como la disminución del desequilibrio nutrimental mediante la activación de transportadores cuando iones como Na^+ o Cl^- son suministrados en cantidades excesivas. Además, tienen la capacidad de mantener altos niveles de fotosíntesis, síntesis de solutos orgánicos, como la prolina, glicina, betaina, proteínas y quinasas. (Hu et al., 2015; Penella et al., 2015).

2.3 Mecanismos de tolerancia a la salinidad

El estrés salino genera cambios metabólicos y fisiológicos que reducen la producción de los cultivos, debido a que las plantas detectan y responden al estrés salino en periodos de tiempo muy corto, por lo que emplean diversos mecanismos de defensa; cuya presencia es indispensable en los portainjertos; entre ellos:

- La activación de señalizaciones de múltiples vías para el transporte de iones (Bacha et al., 2015).
- La regulación mediante células de transferencia que regulan la traslocación de elementos con altas concentraciones a través del floema

para transportarse a las raíces, donde son almacenados en vacuolas de células radicales o expulsados al exterior (Gao et al., 2020).

- El restablecimiento del equilibrio iónico u osmótico al compartimentar el sodio y cloro en hojas de crecimiento activo tras la respuesta de varios genes NHX (Yang & Guo, 2017).
- La capacidad de excluir los iones sodio y cloro a través de los canales iónicos manteniendo la especificidad de absorción de iones indispensables para el desarrollo de la planta (Yuan et al., 2016).
- La regulación de procesos de desarrollo o inhibición del crecimiento mediante el incremento de niveles hormonales en las células (Kazan, 2015).
- El mantenimiento de estructuras del sistema radical de los portainjertos; longitud, biomasa y el área de exploración de éstas; las cuales son determinantes para incrementar la translocación de nutrimentos y conferir al vástago la tolerancia a la salinidad (Huang et al., 2016).

2.4 Tolerancia a salinidad de injertos de jitomate

Las plantas injertadas de jitomate sobre patrones tolerantes a sales muestran menor acumulación de iones Na^+ y Cl^- en xilema y hojas cuando se desarrollan en condiciones de salinidad por Cloruro de Sodio (Al-Harbi, Hejazi & Al-Omram, 2016). En general, la tolerancia o sensibilidad a la salinidad depende de la capacidad del genotipo para tolerar o expulsar iones Na^+ y Cl^- , o mantener sus niveles abajo de la toxicidad mediante mecanismos de exclusión por las raíces o compartimentación en las vacuolas, de modo que la homeostasis fisiológica debe mantenerse estable para incrementar la tolerancia a salinidad y reducir sus efectos en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Cohen et al., 2012).

Plantas injertadas de jitomate sobre patrones tolerantes en condiciones de salinidad (60 mM de NaCl) muestran concentraciones menores de Na^+ y Cl^- , que aquellas sin injertar (Fernandez-García, Cerdá and Carvajal (2003). Aunque se

desconoce la forma precisa del ingreso y rutas de la sal dentro de la planta (Van Zelm, Zhang & Testerink, 2020); así, se requiere la presencia de mecanismos de traslocación reducida de Na^+ y Cl^- , tanto en el vástago como en portainjertos tolerantes a salinidad, con el fin de disminuir los efectos negativos del estrés salino y asegurar el crecimiento normal en la planta (Mutale-joan et al., 2021).

2.5 Absorción nutrimental

La tolerancia y sensibilidad a la sal de un cultivo dependen de su capacidad para extraer agua y nutrientes en condiciones de salinidad para evitar la acumulación excesiva de iones Na^+ y Cl^- en los tejidos (Kaleem et al., 2018).

Los portainjertos, en general, presentan sistemas radicales abundantes que favorecen la absorción de nutrimentos; lo que permite el desarrollo y crecimiento normal de la planta (Sabatino et al., 2018). El Cuadro 1 presenta las concentraciones nutrimentales típicas en jitomate; las cuales varían por efecto de factores como genotipo, edad de la planta, interacción con otros minerales y factores ambientales (Marschner, 1986).

Cuadro 1. Concentración nutrimental en hojas jóvenes de jitomate.

Tiempo de muestreo	Estatus	N	P	%				ppm Fe
				K	Ca	Mg	S	
Etapa de 5 hojas	Rango	3.0	0.30	3.0	1.0	0.30	0.30	40
	adecuado	5.0	0.60	5.0	2.0	0.50	0.80	100
Inicio de floración	Rango	2.8	0.20	2.5	1.0	0.30	0.30	40
	adecuado	4.0	0.40	4.0	2.0	0.50	0.80	100
Inicio de fructificación	Rango	2.5	0.20	2.5	1.0	0.25	0.30	40
	adecuado	4.0	0.40	4.0	2.0	0.50	0.60	100

Fuente: Peet, 2005.

2.6 Injertos

El injerto es la acción de unir dos plantas o variedades diferentes (portainjerto y vástago o injerto) para formar un individuo autónomo mediante regeneración de tejidos, por lo que se desarrollan como una sola planta (Aparecido et al., 2017).

El injerto en jitomate es una técnica utilizada en la producción vegetal sostenible. Consiste en utilizar portainjertos tolerantes al factor de estrés que se desea prevenir; esto permite que el cultivo crezca sano y asegura una producción normal o con mínimas reducciones, por lo que se considera una solución rápida y económica (Genova et al., 2013).

El uso de portainjertos en jitomate se realiza con el propósito de conferir tolerancia al cultivo frente a factores adversos en el suelo, tanto bióticos como abióticos (Hand et al., 2017); como es el caso de hongos y virus (Bao et al., 2015; Cui et al., 2018), temperaturas extremas (Fu et al., 2022), sequía (Yang et al., 2015) y condiciones salinas (Penella et al., 2015; Rivera, Moya & O'Brien, 2022). Así mismo, mejora la capacidad de absorción de agua y nutrimentos que puede favorecer el incremento de la calidad (Barret *et al.*, 2012) y rendimiento de fruto (Savvas et al., 2011; Voutsela et al., 2012). El portainjerto posee alto valor agronómico al permitir combinar genes de resistencia o tolerancia a estrés biótico (Bawa, 2016) o abiótico (Pérez-Labrada et al., 2019), con aquellos de plantas con alta capacidad productiva.

Existen varias técnicas utilizadas en la propagación por injerto en hortalizas, las cuales son implementadas de acuerdo con el tipo de planta u hortaliza con la que se trate. En jitomate a nivel comercial es el método más utilizado es el de empalme (Velasco-Alvarado et al., 2017); el cual requiere que en el punto donde se realiza el corte con un ángulo de 45 °, el diámetro de tallo del injerto y del portainjerto sean iguales, entre 1.5 y 2.5 mm, lo cual se logra entre 25 y 28 días después de la siembra, de acuerdo con el genotipo utilizado. El portainjerto puede realizarse arriba o abajo de los cotiledones; sin embargo, el corte en el vástago siempre ocurre arriba de los cotiledones (Velasco-Alvarado et al., 2017). Las

superficies cortadas se colocan de modo que coincidan ambas regiones del cambium vascular para incrementar el porcentaje de prendimiento. La unión portainjerto/vástago se mantiene mediante el empleo de pinzas especiales de silicón (Pérez-Grajales et al., 2021).

La conexión vascular en injertos compatibles ocurre en tres fases: la cohesión, relacionada con la secreción de sustancias pécticas que forman una capa de aislamiento necrótica para proporcionar soporte mecánico en el punto de unión (Parkinson et al., 1987). La segunda fase es la proliferación de callo en la unión, resultado de la división celular parenquimática en la superficie de contacto entre células que genera la nueva formación de tejido vascular. La tercera fase es la diferenciación vascular, que ocurre cuando existe una completa cicatrización del injerto que denota una planta totalmente funcional tras la diferenciación del parénquima y de las células del callo en los tubos cribosos al formarse una conexión vascular simplástica que permite el intercambio de agua y nutrimentos entre el portainjerto y el injerto (Velasco-Alvarado et al., 2017).

La incompatibilidad del injerto puede ocurrir debido a la incapacidad de unir el vástago con el portainjerto; así como a la falta de crecimiento normal de la planta injertada (Thomas, Gevorgyan & Frank, 2023). Este tipo de incompatibilidad puede ser debida a la discontinuidad vascular en la zona de unión, degeneración del floema y elementos de xilema, los cuales pueden ser obstruidos por acumulación de tilosa e impedir el paso de agua y solutos (Parkinson *et al.*, 1987), lo que resulta en trastornos fisiológicos, disminución del rendimiento, afectación en la calidad de la fruta e incluso la muerte de la planta injertada (Barret et al., 2012). Es por ello que resulta de gran importancia la continuidad de los vasos de xilema en la zona de unión entre el injerto y portainjerto; ya que representa una de las formas más confiables para estimar la compatibilidad y estudiar los efectos sobre el crecimiento de plantas injertadas (Thomas, Gevorgyan & Frank, 2023; Sory-Toure et al., 2010).

2.7 LITERATURA CITADA

- Acosta-Motos JR., Ortuño MF., Bernal-Vicente A., Diaz-Vivancos P., Sanchez-Blanco MJ. & Hernandez JA. (2017). Plant Responses to Salt Stress: adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1), 18. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- Al-Deeb T., Abo GM., El-Assi N., Al-Debei H., Al-Sayaydeh R. & Al-Abdallat AM. (2022). Stress inducible overexpression of *SIDDF2* gene improves tolerance against multiple abiotic stresses in tomato plant. *Horticulturae*, 8, 230. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030230>
- Al-Harbi A., Hejazi A. & Al-Omran A. (2016). Responses of grafted tomato (*Solanum lycopersicon* L.) to abiotic stresses. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24, 1274-1280. DOI: 10.1016/j.sjbs.2016.01.005
- Alves RDC., Rossatto DR., Da Silva JDS., Checchio MV., de Oliveira KR., Oliveira FDA. et al. (2021). Seed priming with ascorbic acid enhances salt tolerance in micro-tom tomato plants by modifying the antioxidant defense system components. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 31, 101927. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101927>
- Aparecido L., Trevisan L. & Falleiros R. (2017). Grafting in vegetable crops: a great technique for agriculture. *International Journal of Vegetable Science*, 24(5), 1-18. DOI:10.1080/19315260.2017.1357062
- Bacha H., Ródenas R., López-Gómez E., García-Legaz MF., Nieves-Cordones M., Rivero RM., et al. (2015). High Ca₂C reverts the repression of high-affinity KC uptake produced by NaC in *Solanum lycopersicum* L. (var. microtom) plants. *Journal of Plant Physiology*, 180, 72-79. DOI: 10.1016/j.jplph.2015.03.014.
- Bao H., Chen X., Lv S., Jiang P., Feng J., Fan P., Nie L. & Li Y. (2015). Virus induced gene silencing reveals control of reactive oxygen species accumulation and salt tolerance in tomato by g-aminobutyric acid metabolic pathway. *Plant, Cell & Environment* 38, 600-613. doi: 10.1111/pce.12419
- Barrett CE., Zhao X., Sims CA., Brecht JK., Dreyer EQ. & Gao ZF. (2012). Fruit composition and sensory attributes of organic heirloom tomatoes as affected by grafting. *Horticulture Technology*, 22, 804-809. DOI: 10.21273/HORTTECH.22.6.804
- Bawa I. (2016). Management strategies of Fusarium wilt disease of tomato incited by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) A Review. *International Journal of Advanced Academic Research* 2, 32-42.
- Boari F., Donadio A., Pace B., Schiattone MI. & Cantore V. (2016). Kaolin improves salinity tolerance, water use efficiency and quality of tomato. *Agricultural Water Management*, 167, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.021>

- Cohen R., Omari N., Porat A. & Edelstein M. (2012). Management of macrophomina wilt in melons using grafting or fungicide soil application: Pathological, horticultural and economical aspects. *Crop Protection*, 35, 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.12.015>
- Cui J., Jiang N., Zhou X., Hou X., Yang G., Meng J. & Luan Y. (2018). Tomato MYB49 enhances resistance to *Phytophthora infestans* and tolerance to water deficit and salt stress. *Plants*, 248, 1487-1503. DOI: 10.1007/s00425-018-2987-6
- De la Torre-González A., Montesinos-Pereira D., Blasco B. & Ruiz JM. (2018). Influence of the proline metabolism and glycine betaine on tolerance to salt stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) commercial genotypes. *Journal of Plant Physiology*, 231, 329-336. DOI: 10.1016/j.jplph.2018.10.013
- Di Gioia F., Signore A., Serio F. & Santamaria P. (2013). Grafting improves tomato salinity tolerance through sodium partitioning within the shoot. *HortScience*, 48, 855-862. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.7.855>
- Fernandez-García N., Cerdá A. & Carvajal M. (2003). Grafting, a useful technique for improving tolerance of tomato?. *Acta Horticulturae*, 609, 251-256. 10.17660/ActaHortic.2003.609.37
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Extent of salt-affected soils. <http://www.fao.org/soilsportal/soilmanagement/management-of-some-problem-sois/salt-affected-soils/more-information-on-saltaffected-soils/en/>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021). Global map of salt-affected soils. v1.0. Available online: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-map-of-salt-affected-soils/en/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). Food and agriculture organization of the united nations. <http://faostat.fao.org/site/339/>.
- Fu S., Chen J., Wu X., Gao H. & Lü G. (2022). Comprehensive evaluation of low temperature and salt tolerance in grafted and rootstock seedlings combined with yield and quality of grafted tomato. *Horticulturae*, 8, 595. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070595>
- Gao YF., Liu JK., Yang FM., Zhang GY., Wang D., Zhang L., Ou YB. & Yao YA. (2020). The WRKY transcription factor WRKY8 promotes resistance to pathogen infection and mediates drought and salt stress tolerance in *Solanum lycopersicum*. *Plant Physiology*, 168, 98-117. doi: 10.1111/ppl.12978

- Genova C., Schreinemachers P. & Afari-Sefa V. (2013). An impact assessment of AVRDC's tomato grafting in Vietnam. AVRDC – The world vegetable center, Shanhua, Taiwan. AVRDC Publication No. 13-773, p. 52.
- Giuffrida F., Gangi D., Giurato R. & Leonardi C. (2013). Effects of NaCl salinity on yield, quality and mineral composition of broccoli and cauliflower. *Acta Horticulturae*, 1005, 531-538. DOI:10.17660/ActaHortic.2013.1005.65
- Hand MJ., Taffouo VD., Nouck AE., Nyemene KPJ., Tonfack B., Meguekam TL. & Youmbi E. (2017). Effects of salt stress on plant growth, nutrient partitioning, chlorophyll content, leaf relative water content, accumulation of osmolytes and antioxidant compounds in pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj- napoca*, 45, 481-490. <https://doi.org/10.15835/nbha45210928>
- Huang Y., Zhao LQ., Kong QS., Cheng F., Niu ML., Xie JJ., Nawaz MA. & Bie ZL. (2016). Comprehensive mineral nutrition analysis of watermelon grafted onto two different rootstocks. *Horticultural Plant Journal*, 2, 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2016.06.003>
- Hu L., Zhang P., Jiang Y. & Fu J. (2015). Metabolomic analysis revealed differential adaptation to salinity and alkalinity stress in kentucky bluegrass (*Poa pratensis*). *Plant Molecular Biology Reporter* 33, 56-68. <https://doi.org/10.1007/s11105-014-0722-4>
- Julkowska MM., Koevoets IT., Mol S., Hoefsloot H., Feron R., Tester MA...& Testerink C. (2017). Genetic components of root architecture remodeling in response to salt stress. *Plant Cell* 29, 3198-213. <https://doi.org/10.1105/tpc.16.00680>
- Kaleem F., Shabir G., Aslam K., Rasul S., Manzoor H., Shah S. & Khan A. (2018). An overview of the genetics of plant response to salt stress: present status and the way forward. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 186, 306-334. <https://doi.org/10.1007/s12010-018-2738-y>
- Kazan K. (2015). Diverse roles of jasmonates and ethylene in abiotic stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 20(4), 219-229. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.02.001>
- Liedl BE., Labate JA., Stommel JR., Slade A. & Kole C. (2013). Genetics, genomics, and breeding of tomato. Science Publishers Inc. USA. 520 p.
- Leiva-Ampuero A., Agurto M., Matus J. T., Hoppe G., Huidobro C., Inostroza-Blancheteau C., Reyes-Díaz M... & Vega A. (2020). Salinity impairs photosynthetic capacity and enhances carotenoid-related gene expression and biosynthesis in tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv. Micro-Tom). *PeerJ* 8, 9742. DOI: 10.7717/peerj.9742
- Liu L., Wang J., Han Z., Sun X., Li H., Zhang J. & Lu Y. (2016). Molecular analyses of tomato GS, GOGAT and GDH gene families and their response to abiotic

- stresses. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38, 229-242. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2251-2>
- Louws FJ, Rivard CL & Kubota C. (2010). Grafting fruiting vegetables to manage soilborne pathogens, foliar pathogens, arthropods and weeds. *Scientia Horticulturae* 127, 127–146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.023>
- Marschner H. 1986. *Mineral nutrition of higher plants*. San Diego, Academic Press.
- Massaretto IL., Albaladejo I., Purgatto E., Flores FB., Plasencia F., Egea-Fernández JM... & Egea I. (2018). Recovering tomato landraces to simultaneously improve fruit yield and nutritional quality against salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1778. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01778>
- Munns R. & Tester M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Murshed R., Lopez-Lauri F. & Sallanon H. (2014). Effect of salt stress on tomato fruit antioxidant systems depends on fruit development stage. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 20, 1-15. DOI: 10.1007/s12298-013-0209-z
- Mutale-Joan C., Rachidi F., Mohamed HA., Mernissi NE., Aasfar A., Barakate M... & Arroussi H. (2021). Microalgae-cyanobacteria-based biostimulant effect on salinity tolerance mechanisms, nutrient uptake, and tomato plant growth under salt stress. *Journal of Applied Phycology*, 33, 3779-3795. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02559-0>
- Nikolskii-Gavrilov I., Landeros-Sánchez C., Palacios-Velez O. & Hernández-Pérez O. (2015). Impact of climate change on salinity and drainage of irrigated lands in Mexico. *Journal of Agricultural Science*, 7(8), 197-204. doi:10.5539/jas.v7n8p197
- Palacios VO. & Pedraza O. (2015). "Drainage and salinity problems in the Mexican irrigation districts: an overview 1962-2013". *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6, 113-123.
- Parkinson MC., Jeffree E. & Yoeman M. M. (1987) Incompatibility in cultured explant-grafts between members of the Solanaceae. *New Phytologist*, 107, 489-498.
- Peet MM. (2005). *Irrigation and fertilization*. In: *Tomatoes*. E Huevelink (ed). CABI Publishing.
- Penella C., Nebauer SG., Quiñones A., San Bautista A., López-Galarza S. & Calatayud A. (2015). Some rootstocks improve pepper tolerance to mild

- salinity through ionic regulation. *Plant Science*, 230, 22. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.10.007>
- Pérez-Grajales M., Pérez-Reyes TQ., Cruz-Álvarez O., Castro-Brindis R. & Martínez-Damián MT. (2021). Compatibilidad del portainjerto CM-334 y su respuesta sobre el rendimiento, calidad fisicoquímica y contenido de capsaicinoides en frutos de *Capsicum pubescens*. *Información Técnica Económica Agraria*, 117, 332-346. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.003>
- Pérez-Labrada F., López-Vargas ER., Ortega-Ortiz H., Cadenas-Pliego G., Benavides-Mendoza A. & Juárez-Maldonado A. (2019). Responses of tomato plants under saline stress to foliar application of copper nanoparticles. *Plants* 8, 151. DOI: 10.3390/plants8060151
- Rahman A., Nahar K., Hasanuzzaman M. & Fujita M. (2016). Calcium supplementation improves NaC/KC ratio, antioxidant defense and glyoxalase systems in salt-stressed rice seedlings. *Frontiers in Plant Science* 7, 609. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00609>
- Rajaniemi TK. & Barrett DT. (2018). Germination responses to abiotic stress shape species distributions on coastal dunes. *Plant Ecology*, 219, 1271-1282. <https://doi.org/10.1007/s11258-018-0877-4>
- Rivera P., Moya C. & O'Brien JA. (2022). Low Salt treatment results in plant growth enhancement in tomato seedlings. *Plants*, 11, 807. <https://doi.org/10.3390/plants11060807>
- Rothan C., Diouf I. & Causse M. (2019). Trait discovery and editing in tomato. *The Plant Journal*, 97, 73-90. DOI: 10.1111/tpj.14152
- Roychoudhury A., Paul S. & Basu S. (2013). Cross-talk between abscisic acid-dependent and abscisic acid-independent pathways during abiotic stress. *Plant Cell Reports*, 32(7), 985-1006. <https://doi.org/10.1007/s00299-013-1414-5>
- Ruiz EFG., Villalpando GRL., Murillo AB., Beltrán MFA. & Hernández MLG. (2014). Respuesta diferencial a la salinidad de genotipos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) En primeras etapas fenológicas. *Terra Latinoamericana*, 32(4), 311-323.
- Sabatino L., Iapichino G., D'Anna F., Palazzolo E., Mennella G. & Rotino GL. (2018). Hybrids and allied species as potential rootstocks for eggplant: Effect of grafting on vigour, yield and overall fruit quality traits. *Scientia Horticulturae* 228, 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.10.020>
- Savvas D., Savva A., Ntatsi G., Ropokis A., Karapanos I., Krumbein A. & Olympios C. (2011). Effects of three commercial rootstocks on mineral nutrition, fruit yield, and quality of salinized tomato. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174, 154–162. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201000099>.

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Retrieved from: <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>.
- Singh H., Kumar P., Kumar A., Kyriacou MC., Colla G., & Rouphael Y. (2020). Grafting tomato as a tool to improve salt tolerance. *Agronomy* 10, 263. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020263>
- Thomas HR., Gevorgyan A. & Frank MH. (2023). Anatomical and biophysical basis for graft incompatibility within the Solanaceae. *Journal of Experimental Botany* 74(15), 4461-4470. doi: 10.1093/jxb/erad155
- Van Zelm E., Zhang Y. & Testerink C. (2020). Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 403-433. doi:10.1146/annurev-arplant-050718-100005
- Velasco-Alvarado MJ., Castro-Brindis R., Avitia-García E., Castillo-González AM., Sahagún-Castellanos J. & Lobato-Ortiz R. (2017). Proceso de unión del injerto de empalme en jitomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8 (5), 1051-1058. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.107>
- Voutsela S., Yarsi G., Petropoulos SA. & Khan EM. (2012). The effect of grafting of five different rootstocks on plant growth and yield of tomato plants cultivated outdoors and indoors under salinity stress. *African Journal of Agricultural Research* 7, 5553-5557. DOI: 10.5897/AJAR11.2448
- Wu H. & Li Z. (2019). The Importance of Cl⁻ exclusion and vacuolar Cl⁻ sequestration: Revisiting the role of Cl⁻ transport in plant salt tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1418. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01418>
- Xiong X., Liu N., Wei Y., Bi Y., Luo J., Xu R., Zhou J. & Zhang Y. (2018). Effects of non-uniform root zone salinity on growth, ion regulation, and antioxidant defense system in two alfalfa cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 434-444. DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.09.028
- Yang Y. & Guo Y. (2017). Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses. *New Phytologist*, 217, 523-539. <https://doi.org/10.1111/nph.14920>
- Yang Y. & Guo Y. (2018). Unraveling salt stress signaling in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 60, 796-804. <https://doi.org/10.1111/jipb.12689>
- Yang Y., Tang N., Xian Z. & Li Z. (2015). Two SnRK2 protein kinases genes play a negative regulatory role in the osmotic stress response in tomato. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 122, 421-434. doi: 10.1007/s11240-015-0779-2
- Yang Y., Yao Y., Li J., Zhang J., Zhang X., Hu L., Ding D... & Xie J. (2022). Trehalose alleviated salt stress in tomato by regulating ROS metabolism,

photosynthesis, osmolyte synthesis, and trehalose metabolic pathways. *Frontiers in Plant Science* 13, 772948. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.772948>

- Yuan W., Flowers JM., Sahraie D.J. & Purugganan M.D. (2016). Cryptic genetic variation for *Arabidopsis thaliana* seed germination speed in a novel salt stress environment. *G3 Genes| Genomes| Genetics*, 6(10), 3129-3138. DOI: 10.1534/g3.116.033944
- Yuan Z., Liu X., Niu S. & Wan S. (2007). Plant nitrogen dynamics and nitrogen-use strategies under altered nitrogen seasonality and competition. *Annals of Botany* 100, 821-830.
- Zhang Z., Cao B., Gao S. & Xu K. (2019). El injerto mejora la tolerancia a la sequía del tomate al mejorar la capacidad fotosintética y reducir la acumulación de ROS. *Protoplasma*, 256, 1013-10.
- Zhong M., Song R., Wang Y., Shu S., Sun J. & Guo S. (2020). TGase regulates salt stress tolerance through enhancing bound polyamines-mediated antioxidant enzymes activity in tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 179, 104191. DOI: 10.3389/fpls.2022.949541

3. EVALUACIÓN DE PORTAINJERTOS DE JITOMATE EN PLANTULA BAJO CONDICIONES DE ALTA SALINIDAD

RESUMEN

El jitomate es la hortaliza más cultivada en el mundo, sin embargo, la salinización del agua y suelo es el principal problema que enfrenta la producción de este cultivo, aunado a la problemática de la sequía y la sobrepoblación mundial. Es necesario seleccionar genotipos que permitan un desarrollo normal de la planta aún en condiciones subóptimas para el cultivo. El objetivo de esta investigación fue seleccionar genotipos que toleren condiciones de salinidad drásticas para su posible uso como portainjertos mediante la evaluación en los cambios morfológicos (longitud de raíz, altura de planta, área foliar, biomasa producida) y fisiológicos (unidades spad) de plántulas de jitomate, bajo dos concentraciones de NaCl (0 y 175 mM), después de 12 días de trasplante. El NaCl disminuyó la altura (39.47 %); área foliar (45.8 %), longitud de raíz (24.8 %) materia seca de raíz (22 %), materia seca de parte aérea (53%) y materia seca total (42.1 %), las unidades SPAD, no fueron modificadas por este estrés. Al comparar el desarrollo en la condición salina respecto al testigo, los genotipos con mayor tolerancia fueron 103, 154 y 155 al no mostrar diferencias ($\alpha \leq 0.05$) en materia seca total y longitud de raíz. Además, incrementaron la materia seca y vigor de la raíz en presencia de NaCl; mecanismo típico de tolerancia a la salinidad.

Palabras clave: portainjerto, área foliar, materia seca, productividad, conductividad eléctrica.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Juan Ramos Jiménez.

Director de la tesis: Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez.

EVALUATION OF TOMATO ROOTS IN SEEDLING UNDER HIGH SALINITY CONDITIONS

ABSTRACT

Tomato is the most cultivated vegetable worldwide; however, water and soil salinization is the main problem facing the production of this crop, coupled with the issues of drought and global overpopulation. It is necessary to select genotypes that allow normal plant development even under suboptimal growing conditions. The objective of this research was to select genotypes that tolerate drastic salinity conditions for potential use as rootstocks by evaluating morphological changes (root length, plant height, leaf area, biomass produced) and physiological changes (SPAD units) in tomato seedlings, under two concentrations of NaCl (0 and 175 mM), after 12 days of transplantation. NaCl decreased plant height (39.47%); leaf area (45.88%); root length (24.8%); root dry matter (22%); shoot dry matter (53%); and total dry matter (42.1%), while SPAD units were not affected by this stress. When comparing development under saline conditions to the control, genotypes with higher tolerance were 103, 154, and 155, as they showed no differences ($\alpha \leq 0.05$) in total dry matter and root length. Additionally, they increased root dry matter and vigor in the presence of NaCl, a typical mechanism of salinity tolerance.

Keywords: rootstock, leaf area, dry matter, productivity, electrical conductivity.

3.1 INTRODUCCIÓN

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la principal hortaliza que se cultiva en el mundo, tanto a cielo abierto como en invernadero (Montaño-Méndez et al., 2021). Sin embargo, la salinización del agua y del suelo es uno de los principales problemas que enfrenta la producción de este cultivo, aunado a la problemática de la sequía y la sobrepoblación mundial. El estrés por salinidad disminuye la productividad del jitomate, dado que es una especie glicofita, medianamente sensible a sales (Bigot et al., 2022) con un umbral de tolerancia de $2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Assaha et al., 2017).

La salinidad provoca en las plantas de jitomate un sinnúmero de efectos fisiológicos, morfológicos y bioquímicos (Shu et al., 2022) que afectan severamente la producción. Por lo que a nivel mundial han incrementado los esfuerzos para obtener nuevos genotipos tolerantes a este y a otros factores adverso bióticos y abióticos.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el potencial como portainjertos con tolerancia a sales de tres híbridos experimentales y una línea nativa de *Solanum lycopersicum* y cinco líneas derivadas de una cruce de *S. lycopersicum* x *S. habrochaites* con base en el vigor, caracteres morfológicos y productividad de biomasa.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Sitio experimental

El experimento se desarrolló en el invernadero de jitomate ubicado en el lote P-2 del campo experimental del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), ubicado en las coordenadas $19^{\circ} 29' 22.2''$ LN y $98^{\circ} 52' 24.7''$ LO y altitud de 2240 msnm. Las temperaturas promedio dentro del invernadero fueron de 14.6°C como mínima y 35°C como máxima.

3.2.2 Genotipos evaluados

Los genotipos evaluados fueron derivados por el Programa de Mejoramiento Genético de Jitomate de la Universidad Autónoma Chapingo, que fueron cinco líneas derivadas de la cruza *S. lycopersicum* x *S. habrochaites* (154, 154-2, 155, H7-29, H9-19), tres híbridos experimentales (47/47, 52/47, 69/47) y una línea derivada de una población nativa. Todas ellas de crecimiento indeterminado,

3.2.3 Manejo experimental

Los genotipos se sembraron el 02 de octubre de 2022 en charolas de poliestireno de 200 cavidades rellenas con espuma agrícola (peat foam foami) Oasis®. El trasplante se realizó 22 días después de la siembra en sistema de balsas flotantes en caja de madera con dimensiones de 2.4 m x 1.2 m y 20 cm de altura, y capacidad de 500 litros de solución nutritiva. Las balsas fueron cubiertas con plástico blanco de invernadero calibre 600 y se colocaron placas de polietileno sobre los contenedores para el sostén de las plantas. Se empleó la solución nutritiva propuesta por Cadahia (2000) para plántula, con modificaciones: 84 ppm de N; 28 ppm de P; 78 ppm de K, 120 ppm de Ca, 24 ppm de Mg, 59 ppm de S, 1 ppm de B, 1.33 ppm de Mn, 0.10 ppm de Cu, 0.07 ppm de Mo, 0.17 ppm de Zn y 5 ppm de Fe.

3.2.4 Concentraciones de Cloruro de Sodio

Cuatro días después del trasplante (DDT), se aplicó la concentración de 175 mM de NaCl, lo que implicó agregar a la solución nutritiva 10.23 g·L⁻¹ de NaCl, con lo que se logró una conductividad eléctrica (CE) de 13 dS·m⁻¹. El testigo no tuvo aplicación de sal (0 mM de NaCl), cuya solución nutritiva tuvo CE de 2.5 dS·m⁻¹. Los datos de conductividad se obtuvieron con un potenciómetro Hanna® (Hi98130, USA).

3.2.5 Unidad y diseño experimental

La unidad experimental (UE) estuvo conformada por cinco plántulas de cada genotipo, distanciadas por 5 cm y la distancia entre UE fue de 9.5 cm. Se empleó un diseño experimental en bloques completos al azar con tres repeticiones, donde se evaluaron 18 tratamientos (nueve genotipos en dos CE, 0 mM y a 175 mM de NaCl).

3.2.6 Caracteres evaluados

Al finalizar la prueba, 12 DDT, se evaluaron los caracteres:

Altura final de plántula (AP, en cm) promedio de las tres plántulas centrales de la UE.

A partir de 5 plántulas de la UE se midieron los siguientes caracteres:

Área foliar (FA, en cm²): A partir de fotografías digitales de hojas procesadas en el software ImageJ (v1.54i; National Institutes of Health).

Longitud de raíz promedio (LR, en cm): A partir de fotografías digitales que procesadas en el software ImageJ (v1.54i; National Institutes of Health).

Materia seca parte aérea (MSP, en g): secada durante 72 horas a 50 °C.

Materia seca de raíz (MSR, en g): secada durante 72 horas a 50 °C.

Materia seca total (MST, en g): Calculada de la suma de (MSP + MSR, en g).

Unidades Spad (como indicador de concentración de clorofila): Promedio de mediciones obtenidas en hojas jóvenes de las tres plantas centrales de la unidad experimental con medidor de unidades SPAD digital (SPAD-502PLUS, Tokio)

3.2.7 Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de varianza y comparación múltiple de medias (Tukey, $\alpha \leq 0.05$) en los caracteres evaluados. Los análisis se obtuvieron con el paquete estadístico SAS- V9.0.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza de la prueba de tolerancia a NaCl en plántula (Cuadro 2) indicó diferencias significativas ($\alpha \leq 0.001$) en todos los caracteres evaluados, excepto unidades SPAD para las fuentes de variación genotipo (GEN), concentración de NaCl (CON) y la interacción GENxCON. Esto indica modificaciones del desarrollo de la planta ante el estrés salino y comportamiento diferencial de genotipos ante las concentraciones de NaCl.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza de siete caracteres evaluados en plántula en nueve genotipos de jitomate con 0 y 175 mM de NaCl en la solución nutritiva.

FV	GL	ALT	USP	AF	MSA	MSR	MST	LR
GEN	8	31.24**	17.18	20816.5**	2.87**	1.13**	7.11**	184.41**
CON	1	492.32**	0.13	118081.1**	23.57**	1.16**	33.9**	319.42**
GEN*CON	8	6.4**	0.55	7331.3**	0.65**	0.59**	3.36**	11.66**
BLO	2	0.18	10.61	53.55	0.16	0.1	1.53**	24.15
Error	34	0.43	7.19	142.81	0.1	0.14	0.26	13.78
Total	53							
CV		5.4	6.08	7.61	15.59	31.76	17.07	21.9
Media		12.24	44.11	157.02	1.79	1.21	3	16.95

FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, CON: Concentración de NaCl en mM, GEN: genotipo, BLO(CON): bloque anidado en concentración de NaCl, GEN*CE: genotipo*concentración de NaCl, CV: coeficiente de variación, ALT: altura final, USP: unidades SPAD, AF: área foliar total, MSA: materia seca de parte aérea, MSR: materia seca de raíz, MST: materia seca total, LR: Longitud de raíz, ** Altamente significativo con $\alpha \leq 0.001$.

De acuerdo con la comparación de medias la condición salina redujo ($P \leq 0.05$) la altura de planta, área foliar, materia seca acumulada de la parte aérea, materia seca de raíz, materia seca total y longitud de raíz (Cuadro 3); en contraste, unidades SPAD no presentó diferencias significativas. La parte aérea fue la más afectada por el NaCl, ya que la altura, área foliar y materia seca disminuyeron en 39.47, 45.88 y 53 %, respectivamente. También hubo reducciones importantes

en el desarrollo radical, donde materia seca y longitud de raíz disminuyeron ($P \leq 0.05$) 22 y 24.8%, respectivamente.

Cuadro 3. Comparación de medias de concentraciones de NaCl y porcentaje de reducción de caracteres evaluados.

CON (mM)	ALT (cm)	USP	AF (cm ²)	MSA (cm)	MSR (cm)	MST (g)	LR (g)
0	15.2A	44.16a	203.786 a	2.43 a	1.36 a	3.8 a	19.3 a
175	9.2B	44.07a	110.26 b	1.14b	1.06 b	2.2 b	14.5 b
DMSH	0.36	1.48	6.61	0.15	0.21	0.21	2.05
Reducción%	39.47	0.23	45.88	53	22	42.1	24.8

CON: concentración de NaCl, ALT: altura, USP: unidades SPAD, AF: área foliar total, MSA: peso seco de parte aérea, MSR: peso seco de raíz, MST: materia seca total y LR: longitud de raíz. DMSH=Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

A partir de la comparación de medias para la interacción GENxCON (Cuadro 4), se consideró como genotipos tolerantes aquellos que no mostraron diferencias ($\alpha \leq 0.05$) ante las dos concentraciones de NaCl de la solución nutritiva. Así, la altura de planta, área foliar y materia seca de la parte aérea disminuyeron ($\alpha \leq 0.05$) en la condición salina en todos los genotipos; en contraste; las unidades spad tuvieron el mismo comportamiento en ambas concentraciones de NaCl (0 y 175 mM).

La concentración de NaCl en la solución nutritiva no modificó ($\alpha \leq 0.05$) el contenido de clorofila (uspad), resultado contrastante con el obtenido por Sholi (2012) en concentraciones de 50 y 100 mM.

Todos los genotipos redujeron la acumulación de materia seca aérea, área foliar y altura de planta; cabe destacar que las líneas 103, 154 y 155 mostraron menores reducciones en estas variables (Cuadro 4). Estos resultados son similares a los de SanJuan-Lara et al. (2015) en concentraciones de 6 dS·m⁻¹.

Debido al incremento de cloruro de sodio al interior de las células, obliga a la planta a sintetizar osmolitos (Tang, 2015), proteínas y enzimas eliminadoras de especies reactivas de oxígeno (Shu et al., 2022; Zhao et al., 2021), lo que reduce la masa de la parte aérea y altura al disminuir la longitud de los entrenudos (van Zelm *et al.*, 2020); consecuentemente el área foliar se modifica debido a la

alteración de la demanda de productos fotosintéticos, por lo que el crecimiento y desarrollo de las mismas se interrumpe (Sholi, 2012).

Los genotipos 103, 154 y 155 no difieren ($P \leq 0.05$) en materia seca total y longitud de raíz en condiciones de la solución testigo con respecto al tratamiento con NaCl; así mismo, estos tres genotipos incrementaron con respecto al testigo entre 22 y 46 % su longitud de la raíz; mientras que el resto de genotipos mostraron reducciones de mayor magnitud. Esto se atribuye a que los genotipos cuentan con genes metabólicos y canales selectivos que regulan la presencia de sal como respuesta adaptativa de la especie ante condiciones salinas (Zhao et. al., 2020). Estos resultados demuestran que mayor proporción radicular puede constituir un mecanismo típico de tolerancia de las plantas en condiciones salinas.

Los genotipos con mayor acumulación de biomasa bajo concentración de 175 mM en solución nutritiva fueron 103, 154 y 155; lo que denota una menor sensibilidad a la salinidad (Albacete et al., 2008), estos resultados indican que la acumulación de materia seca en la raíz confirió la capacidad a la planta para realizar una mejor homeostasis iónica para contrarrestar los efectos osmóticos provocados por la sal e incrementar la absorción de agua y nutrientes, reflejado en una menor afectación del crecimiento y desarrollo de las plantas (Acosta-Motos et al., 2017).

Cuadro 4. Comparaciones de medias de la interacción GENxCON de 9 genotipos de jitomate expuestos a dos concentraciones de NaCl. Las comparaciones se realizaron entre concentraciones dentro de cada genotipo.

GEN	CON (mM)	ALT (cm)	USP	AF (cm ²)	MSA (g)	MSR	MST	LR
103	0	15.12 a	43.39 a	218.05 a	2.91 a	1.3 b	4.22 a	20.46 a
103	175	12.21 b	43.76 a	187.81 b	2.39 b	1.9 a	4.29 a	18.58 a
%		19.24	-0.85	13.83	17.86	-46.15	-1.65	9.18
47/47	0	16.37 a	44.63 a	214.26 a	2.88 a	1.18 a	4.07 a	16.24 a
47/47	175	8.34 b	43.89 a	60.52 b	0.61 b	0.37 b	0.99 b	8.96 b
%		53.84	1.65	71.75	78.81	68.64	75.67	44.82
52/47	0	16.37 a	45.89 b	207.79 a	2.28 a	1.11 a	3.39 a	18.46 a
52/47	175	8.34 b	46.41 a	60.74 b	0.64 b	0.56 b	1.21 b	13.56 b
%		49.05	-1.13	70.76	71.9	49.54	64.3	26.54
69/47	0	14.91 a	43.86 a	222.30 a	1.97 a	1.19 a	3.17 a	15.14 a
69/47	175	8.05 b	43.82 a	50.32 b	0.54 b	0.77 b	1.31 b	10.13 b
%		46	0.09	77.36	72.58	35.29	58.67	33.09
152	0	17.22 a	44.81 a	251.31 a	3.08 a	1.91 a	4.99 a	22.15 a
152	175	9.97 b	45.53 a	113.48 b	1.27 b	0.67 b	1.94 b	12.73 b
%		42.1	-1.6	54.84	58.76	64.92	61.12	42.52
154	0	17.58 a	45.08 a	325.81 a	2.15 a	1.44 b	3.59 a	27.71 a
154	175	12.33 b	45.07 a	261.29 b	1.72 b	1.77 a	3.49 a	26.33 a
%		29.86	0.02	18.57	20	-22.91	2.78	4.98
155	0	16.48 a	43.90 a	224.36 a	3.17 a	1.75 b	4.92 a	24.43 a
155	175	12.67 b	42.91 a	196.37 b	2.62 b	2.25 a	4.88 a	22.90 a
%		23.11	2.25	12.47	17.35	-28.57	2.03	6.26
H7-29	0	10.44 a	44.93 a	165.01 a	1.94 a	1.23 a	3.18 a	15.75 a
H7-29	175	6.27 b	45.63 a	34.49 b	0.17 b	0.79 b	0.96 b	9.56 b
%		39.94	-1.55	79.09	91.23	35.77	69.81	39.3
H919	0	12.83 a	40.15 a	95.19 a	1.52 a	1.11 a	2.64 a	14.07 a
H919	175	5.58 b	40.48 a	27.31 b	0.29 b	0.50 b	0.80 b	7.89 b
%		56.5	-0.82	71.31	80.92	54.95	69.69	43.92

GEN: genotipo, CON: Concentración de NaCl, %: porcentaje de reducción, ALT: altura, US: unidades SPAD, AF: área foliar total, MSR: materia seca de raíz, MST: materia seca total, LR: longitud de raíz, DMSH=Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

3.4 CONCLUSIONES

Los genotipos 103, 154 y 155 fueron notablemente sobresalientes al no reducir los valores de materia seca total y longitud de raíz, e incrementar la materia seca de raíz. Esta última respuesta es un mecanismo típico de tolerancia de las plantas a la salinidad. Por lo que estas tres líneas (103, 154 y 155) podrían ser consideradas como portainjertos potenciales debido a su mayor tolerancia a condiciones salinas.

3.5 LITERATURA CITADA

- Acosta-Motos, J. R., Ortuno, M. F., Bernal, V. A., Diaz V.P., Sánchez, B. M. J. & Hernandez, J. A. (2017). Plant responses to salt stress: adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7, 18. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- Albacete A., Ghanem ME., Martínez AC., Acosta M., Sánchez BJ., Martínez V., Lutts S., Dodd IC. & Pérez AF. (2008). Hormonal changes in relation to biomass partitioning and shoot growth impairment in salinized tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. *Journal of Experimental Botany*, 59(15), 4119-4131. 10.1093/jxb/ern251.
- Assaha DVM., Ueda A., Saneoka H., Al-Yahyai R. & Mahmoud W. (2017). The role of Na⁺ and K⁺ transporters in salt stress adaptation in glycophytes. *Frontiers in Physiology*, 8, 509. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00509>
- Bigot S., Pongrac P., Šala M., van Elteren JT., Martinez JP., Lutts S. & Quinet M. (2022). The halophyte species *Solanum chilense* Dun. Maintains its reproduction despite sodium accumulation in its floral organs. *Plants*, 11, 672. 10.3390/plants11050672
- Cadahia C. (2000). *Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales* (2da. Ed.). Ediciones Mundi-prensa.
- Montaño-Méndez IE., Valenzuela-Patrón IN. & Villavicencio-López KV. (2021). Competitividad del tomate rojo de México en el mercado internacional: análisis 2003-2017. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1185-1197. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2531>
- Sanjuan-Lara F., Ramírez-Vallejo P., Sánchez-García P., Sandoval-Villa M., Livera -Muñoz M., Carrillo-Rodríguez JC. & Perales-Segovia C. (2015). Tolerancia de líneas nativas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a la salinidad con NaCl. *Interciencia*, 40(10), 704-709.
- Sholi NJY. (2012). Effect of salt stress on seed germination, plant growth, photosynthesis and ion accumulation of four tomato cultivars. *American*

Journal of Plant Physiology, 7, 269–275.
<https://doi.org/10.3923/ajpp.2012.269.275>

- Shu P., Li Y., Li Z., Sheng J. & Shen L. (2022). *SIMAPK3* enhances tolerance to salt stress in tomato plants by scavenging ROS accumulation and up-regulating the expression of ethylene signaling related genes. *Environmental and Experimental Botany*, 193, 104698. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104698>
- Tang X., Mu X., Shao H., Wang H. & Brestic M. (2015). Global plant-responding mechanisms to salt stress: Physiological and molecular levels and implications in biotechnology. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35, 425-437. 10.3109/07388551.2014.889080
- van Zelm E., Zhang Y. & Testerink C. (2020). Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 403–433. 10.1146/annurev-arplant-050718-100005
- Zhao C., Zhang H., Song C., Zhu JK. & Shabala S. (2020). Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. *The Innovation*, 1(1), 100017. 10.1016/j.xinn.2020.100017
- Zhao, S.; Zhang, Q.; Liu, M.; Zhou, H.; Ma, C.; Wang, P. (2021). Regulation of plant responses to salt stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9):4609. 10.3390/ijms22094609

4. SELECCIÓN DE PORTAINJERTOS DE JITOMATE TOLERANTES A SALINIDAD EN ETAPA VEGETATIVA

RESUMEN

Un método eficaz para reducir el estrés salino en el cultivo de jitomate es el uso de portainjertos tolerantes que, al presentar alto vigor, confieren al vástago mayor tolerancia a la salinidad, al promover el crecimiento y mejorar las concentraciones de nutrimentos en el vástago. El objetivo de la presente investigación fue seleccionar portainjertos tolerantes a sales durante la fase vegetativa de jitomate. Para ello, en plantas injertadas y no injertadas sometidas a dos concentraciones de NaCl (0 y 70 mM) en la solución nutritiva, se evaluaron los cambios morfológicos de plantas (longitud de raíz, altura, área foliar, biomasa producida) y la concentración de nutrimentos (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Na, Cl y S) en hoja y tallo. Los portainjertos 155 y Carbonite mejoran el crecimiento vegetativo de las plantas, al incrementar el peso de raíz, área foliar y acumulación de materia seca total. La mejora del crecimiento de plantas se atribuye al mayor vigor del crecimiento de las raíces, lo cual influyó directamente en la eficiencia del transporte de agua y nutrientes. La presencia de NaCl en la solución nutritiva (70 mM) redujo ($\alpha \leq 0.05$) en tallos y en hoja las concentraciones de K, Mg y S e incrementó las de P, Ca, Fe, Cl y Na en la mayoría de los genotipos. La concentración de N no fue modificada por el estrés salino. Los portainjertos con mejor desempeño en condiciones salinas, especialmente el 155, incrementaron las relaciones K^+/Na^+ , Ca^{2+}/Na^+ y Mg^{2+} en hojas y tallos; lo cual está asociado a la mayor selectividad hacia Na^+ para evitar o disminuir su entrada a la planta y, una vez dentro de la planta, promover su compartimentación, lo que permite restablecer la homeostasis iónica. Además, estos portainjertos incrementaron la materia seca y superficie de exploración de las raíces, lo que mejora la absorción de nutrimentos e incrementa el área foliar y materia seca total.

Palabras clave: hoja, injerto, nutrimentos, vástago, NaCl

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Juan Ramos Jiménez.

Director de la tesis: Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez

SELECTION OF SALINITY-TOLERANT TOMATO ROOTS IN THE VEGETATIVE STAGE

ABSTRACT

An effective method to mitigate saline stress in tomato cultivation involves the utilization of tolerant rootstocks, which, by exhibiting high vigor, confer greater salinity tolerance to the scion, thereby promoting growth and enhancing nutrient concentrations in the shoot. The aim of this study was to select rootstocks tolerant to salts during the vegetative phase of tomato. To accomplish this, both grafted and non-grafted plants were subjected to two concentrations of NaCl (0 and 70 mM) in the nutrient solution, and morphological changes in plants (root length, height, leaf area, biomass produced) as well as nutrient concentrations (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Na, Cl, and S) in leaves and stems were evaluated. Rootstocks 155 and Carbonite improve the vegetative growth of plants by increasing root weight, leaf area, and total dry matter accumulation. The enhancement in plant growth is attributed to the greater vigor of root growth, which directly influenced the efficiency of water and nutrient transport. The presence of NaCl in the nutrient solution (70 mM) decreased ($\alpha \leq 0.05$) concentrations of K, Mg, and S in stems and leaves and increased those of P, Ca, Fe, Cl, and Na in most genotypes. The concentration of N was unaffected by saline stress. Rootstocks exhibiting superior performance under saline conditions, particularly 155, increased the ratios of K/Na, Ca/Na, and Mg/Na in leaves and stems, which is associated with greater selectivity towards Na^+ to prevent or reduce its entry into the plant and, once within the plant, promote its compartmentalization, thereby enabling the restoration of ionic homeostasis. Furthermore, these rootstocks increased root dry matter and exploration surface area, thereby improving nutrient absorption and increasing leaf area and total dry matter.

Keywords: leaf, graft, nutrients, shoot, NaCl.

4.1 INTRODUCCION

A nivel mundial, la salinidad del suelo o del agua se ha convertido en un grave problema para la agricultura; la superficie afectada por la salinidad es aproximadamente el 20 % de las tierras irrigadas del mundo. En México el 40 % del total de las tierras irrigadas se ven afectadas por las mismas condiciones (Nikolskii-Gavrilov et al., 2015).

La salinidad es uno de los principales factores abióticos que limitan el desarrollo de los cultivos agrícolas, como el jitomate (Abdelgawad et al., 2019), pues afecta la absorción de agua por estrés iónico y osmótico en las plantas, reduce su crecimiento y productividad, genera toxicidad e interrupción en la absorción iónica, lo que resulta en desbalances nutrimentales (Rivera, Moya & O'Brien., 2022).

Varios parientes silvestres del jitomate, como *S. pimpinellifolium*, *S. chilense*, *S. pennellii*, *S. cheesmaniae* y *S. galapagense* se adaptan naturalmente a suelos altamente salinos; sin embargo, durante el proceso de domesticación del cultivo jitomate provocó erosión genética y, con ello, pérdidas de tolerancias o resistencias a diferentes tipos de estrés abiótico y biótico (Yang et al. 2019). La incorporación de genes de tolerancia de parientes silvestres a cultivares de élite es un desafío debido a la complejidad de los rasgos de tolerancia a la sal, que pueden resultar en la transferencia de loci perjudiciales para el desarrollo y el rendimiento de la planta, dificultando la recuperación del trasfondo genético del cultivar de élite (Cuartero et al. 2006; Gharsallah et al. 2016).

Así, una alternativa para conjuntar estos complejos genéticos es la técnica de injerto de variedades con alto rendimiento sobre patrones tolerantes a factores adversos del suelo, lo que ofrece una solución rápida y eficiente a estos problemas. El uso de portainjertos tolerantes a diversos factores es cada vez más frecuente en la producción (Ntatsi et al., 2013).

En el cultivo de jitomate se ha demostrado que los portainjertos con un sistema radical vigoroso confieren al vástago mayor tolerancia a la salinidad debido a que

promueven mayor crecimiento y reducen las concentraciones de Na^+ y Cl^- en las hojas del vástago (Albacete et al., 2015).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar en plantas de jitomate injertadas y no injertadas los cambios morfológicos (longitud de raíz, altura de planta, área foliar, biomasa producida) y nutrimentales (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Na, Cl y S) en hoja y tallo causados por estrés salino.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1 Localización

El experimento se realizó en un invernadero de tecnología media del Programa de Mejoramiento Genético de Jitomate del Departamento de Fitotecnia, de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), situado en las coordenadas 19°29'35" LN, 98°52'19" LO y 2,267 msnm. Los niveles promedio de temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa del invernadero fueron 21 °C, 65 % y 144.2 $\mu\text{moles de fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente.

La determinación del contenido nutrimental se realizó en el laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Suelos de la UACH.

4.2.2 Material vegetal

Los portainjertos evaluados fueron tres líneas (103, 154 y 155) derivadas de una cruce de *S. lycopersicum* x *S. habrochaites*, y el cultivar comercial Carbonite de la empresa The Rootstock Company. Como vástago se empleó El Cid F1 (HM Clause). Todos los genotipos usados son de crecimiento indeterminado.

'El Cid F1' se sembró el 23 de abril del 2023 en charolas de poliestireno de 200 cavidades rellenas con peat foami y cubiertas con vermiculita. Los portainjertos

se sembraron dos días después, con la finalidad de hacer coincidir los diámetros del tallo (1.8 a 2.2 mm) del injerto y el portainjerto.

4.2.3 Proceso de injertación

Una vez sincronizados los diámetros de tallo en el punto de corte (25 días después de la siembra), se realizó la injertación tipo empalme, de acuerdo con la metodología empleada por Pérez-Grajales et al. (2021).

1. Se seleccionó el vástago y el portainjerto con un diámetro de 1.8 a 2.2 mm.
2. Se realizó un corte con un ángulo de aproximadamente 45° en el tallo del portainjerto por debajo de los cotiledones.
3. Se colocó la pinza de silicón de 1.8 a 2.2 mm en el tallo del portainjerto, hasta la mitad de su longitud, dejando espacio para colocar el vástago justo arriba.
4. El tallo del vástago se cortó en un ángulo de 45° en donde coincidiera con el portainjerto previamente cortado y posteriormente se deslizó en la pinza de silicón hasta empalmarlo con el tallo del portainjerto, procurando que los cortes se mantuvieran paralelos. La pinza de silicón permaneció hasta la formación de callo natural.
5. Las plantas injertadas fueron colocadas inmediatamente a una cámara con ambiente de 23 a 28 °C, humedad relativa entre 85 a 95 % y a baja radiación ($125 \mu\text{moles de fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$) durante 7 días.
6. Posteriormente, a los cuatro días se realizó la aclimatación de las plantas injertadas, que consiste en ir abriendo la cámara para reducir paulatinamente la humedad relativa y radiación.
7. Después de los 7 días se llevan al invernadero de plántula para su acondicionamiento, donde se mantiene 7 o 10 días, en caso de usar un solo tallo por planta injertada.

4.2.4 Trasplante

El 02 de junio de 2023 se realizó el trasplante en condiciones de balsas flotantes e invernadero, la distancia de trasplante fue de 17.69 cm entre plantas y 27.5 entre hileras. Las plántulas de los 5 genotipos, con sus respectivos autoinjertos y heteroinjertos se colocaron en las placas de polietileno ubicadas sobre las balsas flotantes de 2.4 m x 1.2 m y 20 cm de altura, cubiertas con plástico blanco de invernadero calibre 600 y capacidad de 500 litros solución nutritiva para plántula propuesta por Cadahia (2000) con algunas modificaciones: 84 ppm de N; 28 ppm de P; 78 ppm de K, 120 ppm de Ca, 24 ppm de Mg, 59 ppm de S, 1 ppm de B, 1.33 ppm de Mn, 0.10 ppm de Cu, 0.07 ppm de Mo, 0.17 ppm de Zn y 5 ppm de Fe.

4.2.5 Concentraciones de Cloruro de Sodio

Cinco días después del trasplante (DDT), se aplicó la concentración de 70 mM de NaCl a la solución nutritiva, lo que correspondió a la aplicación de $4.09 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; así mismo, se consideró un tratamiento sin aplicación de sales (0 mM). La conductividad eléctrica de la solución nutritiva fue de $2.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y cuando se agregaron los 70 mM de NaCl fue de $6.9 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$.

4.2.6 Unidad y diseño experimental

La unidad experimental (UE) constó de 1 planta. Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con 28 tratamientos y 3 repeticiones.

4.2.7 Caracteres evaluados

4.2.7.1 Características morfológicas

Los caracteres estudiados fueron medidos 24 días después de realizar la salinización con NaCl a la solución nutritiva:

Altura de planta (AP, en cm): medida en tres plántulas de la UE a los 28 días después del trasplante.

Longitud de raíz (LR, en cm): Se capturaron fotografías de las raíces, y posteriormente, se calculó su longitud mediante el software ImageJ (v1.54i; National Institutes of Health) con una escala conocida.

Materia seca de raíz (MSR, en g): secada a 50 °C hasta peso constante.

Materia seca parte aérea (MSP, en g): secada a 50 °C hasta peso constante.

Materia seca total (MST en g), obtenida como la suma de MSP + MSR.

Área foliar (AF, en cm²): Se tomaron fotografías digitales con una escala conocida y posteriormente se determinó mediante el software ImageJ (v1.54i; National Institutes of Health).

4.2.7.2 Concentraciones nutrimentales

Concentraciones químicas de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Na y Cl, expresadas en porcentaje. Para su determinación se utilizaron las metodologías propuestas por la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Para la concentración de nutrientes se realizó la recolección y procesamiento de hojas y tallos al final del experimento. El método de recolección de estos órganos se efectuó como se describe a continuación: a) hojas: se seleccionaron tres repeticiones por tratamiento; en cada una se recolectaron de 8 a 10 folíolos por planta, de las hojas más recientemente maduras, justo debajo del punto de crecimiento. Se colocaron en bolsas de papel y se transportaron al laboratorio para su procesamiento, b) tallo: se realizaron tres repeticiones por tratamiento; se tomaron muestras de 25 g de tallos al momento de la cosecha. Los pasos subsecuentes a la recolección fueron los mismos en ambos órganos extraídos. En laboratorio cada muestra obtenida se pasó por un tren de lavado de cuatro tiempos con agua destilada. Las muestras limpias se acomodaron en bolsas de

papel craft y se dejaron secar por 72 h en horno de secado por convección de aire forzado marca Binder 108 modelo ED400 a una temperatura de 70 °C. Cada muestra seca se procesó en un molino de acero inoxidable marca Thomas Wiley Mill modelo ED-5 para reducir su tamaño y homogeneizar.

Posteriormente, para la digestión húmeda se pesaron 0.5 g de materia seca y se transfirieron a matraces kjeldal en donde se agregaron 4 ml de una mezcla diácida (ácido sulfúrico: ácido perclórico, relación 4:1 v/v) y 2 ml de peróxido de hidrógeno grado reactivo, que se colocaron en una plancha de digestión marca Lindberg a una temperatura de 250-300 °C para lograr una oxidación completa de la muestra. Concluido el proceso, los digestados se dejaron enfriar y se transfirieron a matraces volumétricos de 50 ml, en donde se aforaron con agua destilada, y se guardaron en frascos de plástico en oscuridad y temperatura ambiente.

A partir de los digestados se determinó el contenido de N, P, K, Ca, Mg, S, Na y Cl en % de muestra y Fe en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, se utilizaron las metodologías propuestas por la NOM-021-SEMARNAT-2000.

El N se determinó por el método micro Kjeldahl de destilación simple (Jones, Wolf & Mills, 1991); se tomó una alícuota de 20 ml por cada muestra digestada y se vació en un matraz Kjeldahl, en donde se adicionaron 20 ml de NaOH al 30% y se conectó al flujo de vapor; rápidamente se colocó un matraz Erlenmeyer al final del tubo del refrigerante, el cual contenía 10 ml de una solución de ácido bórico mezclado con dos indicadores (verde de bromocresol y rojo de metilo); se destiló hasta que el volumen del frasco Erlenmeyer alcanzó la marca de los 75 mL; posteriormente, se determinó el nitrógeno total presente en el destilado para lo cual se tituló con ácido sulfúrico 0.05 N (Jones, Wolf & Mills, 1991).

En la determinación de P se usó el método de desarrollo de color vanadato-molibdato (Jackson, 1964); se tomaron 5 ml por muestra que se transfirieron a un matraz aforado a 50 ml; a cada matraz se le agregó 10 ml de ácido nítrico 2 N y 5 ml de una mezcla vanadato-molibdato y se aforó con agua destilada; así mismo, se elaboró la curva patrón de P a las concentraciones de 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 y

12.5 mg·L⁻¹, respectivamente; se dejaron reposar por aproximadamente una hora y se realizaron lecturas de absorbancia a 420 nm con espectrofotómetro de luz ultravioleta (marca Thermo Scientific modelo Genesys 10uv).

El K, Ca y Na se determinaron por flamometría en un equipo Sherwood modelo 410, para ello se realizaron diluciones 1:10.

Los cationes Mg y Fe, se cuantificaron con un espectrofotómetro de absorción atómica GBC modelo Avanta, para ello se realizaron diluciones 1:10.

Para la determinación de Cl se tomó una alícuota de 5 ml y se transfirió a un matraz, se le agregaron 20 ml de agua destilada y 5 gotas de indicador cromato de potasio al 5 % y se tituló con AgNO₃ a 0.025 N, hasta el vire (color ladrillo).

4.2.8 Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza, comparaciones de medias (Tukey) y mediante contrastes, la comparación de grupos por concentración (0 mM y 70 mM), órgano (hoja y tallo), plantas sin injertar (S), autoinjertadas (A) y heteroinjertadas (H). Se empleó el paquete computacional SAS- V9.0.

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1 Características morfológicas

El análisis de varianza de la prueba de tolerancia a NaCl en plantas, realizada durante 28 días después del trasplante (Cuadro 5), indicaron efectos significativos ($\alpha \leq 0.01$) en todas las fuentes de variación: genotipo (GEN), concentración de NaCl (CON) e interacción GEN x CON. Esto sugiere que los genotipos, así como los niveles de NaCl, tuvieron comportamiento diferencial; la interacción de estos factores indicó que los genotipos de tienen comportamientos particulares dentro de cada nivel de NaCl (0 y 70 mM). Además, los coeficientes de variación (CV) para todas las variables evaluadas fueron menores al 21%, lo que asegura la confiabilidad de los resultados.

Cuadro 5. Análisis de varianza de seis caracteres evaluados en plantas sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas de jitomate en condiciones de 0 y 70 mM de NaCl.

FV	GL	MSR	MSA	MST	LR	AF	ALT
GEN	13	16.52**	729.31**	959.47**	1158.9**	10.74**	834.48**
CON	1	4.92**	3544.7**	3814**	662.7*	71.78**	22643.2**
GEN*CON	13	2.37**	122.53**	142.72**	422.1**	3.05**	393.43**
BLO	5	0.67	35.49	41.1	242.4	0.07	8.14
Error	135	0.77	17.51	20.32	178.2	0.24	44.44
Total	167						
CV		20.64	14.49	13.61	20.86	12.6	7.36
Media		4.25	28.86	33.12	63.97	3.96	90.56

FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, CON: Concentración de NaCl en mM, GEN: genotipo, BLO(CON): bloque anidado en concentración de NaCl, GEN*CON: genotipo*concentración de NaCl, CV: coeficiente de variación, ALT: altura final, USP: unidades SPAD, AF: área foliar total, MSA: materia seca de parte aérea, MSR: materia seca de raíz, MST: materia seca total, LR: Longitud de raíz, ** Altamente significativo con $\alpha \leq 0.001$.

El estrés salino modificó la expresión de todos los caracteres ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 6), excepto en la longitud de la raíz (LR). Las variables más afectadas por el NaCl fueron las relacionadas con la parte aérea, con disminuciones de 27.5% en la materia seca, 28.3 % en área foliar y 22.7% en altura de planta. La materia seca total también presento reducciones importantes de 25.15 %.

Los resultados obtenidos en este experimento concuerdan con los de Öztekin et al. (2009), quienes detectaron reducciones en la producción de materia seca de hojas, tallo y raíces en los portainjertos ‘Heman’ y ‘Beaufort’ injertados con el cv. Durinta. También la longitud de la raíz de jitomate ha sido afectada negativamente con el incremento de la concentración de salinidad (Mutale-joan et al., 2021). Esto es debido a que el estrés salino disminuye el potencial hídrico en la rizósfera, lo que impide la absorción de agua y nutrientes; por lo que las células de la raíz y vástago detienen su crecimiento como el resultado de la disminución en la presión de turgencia (Zhao et al., 2020); situación que evita el crecimiento de órganos.

Cuadro 6. Comparación de medias y porcentaje de reducción de variables morfológicas por concentración de NaCl con respecto al testigo en cuatro portainjertos y El Cid F1 sin injertar, autoinjertos y heteroinjertos de jitomate.

CON (mM)	MSR (g)	MSA (g)	MST (g)	LR (cm)	AF (cm ²)	ALT (cm)
0	4.43 a	33.45 a	37.88 a	65.9 a	4.6 a	102.1 A
70	4.08 b	24.26 b	28.35 b	61.9 a	3.3 b	78.9 B
DMSH	0.26	1.27	1.37	4.1	0.15	2.03
Reducción%	7.9	27.47	25.15	6	28.26	22.72

CON: concentración de NaCl, MSA: peso seco de parte aérea, MSR: peso seco de raíz, MST: materia seca total, LR: longitud de raíz, AF: área foliar total y ALT: altura. DMSH=Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Se observaron diferencias significativas en el análisis de la interacción GENxCON (Cuadro 7) al comparar las medias de cada genotipo en las dos concentraciones de NaCl en la solución nutritiva. En general estas reducciones fueron ($P \leq 0.05$) mostrando el efecto negativo del estrés salino. Los genotipos CAR, 154 y 155 mostraron un aumento significativo ($P \leq 0.05$) en longitud y materia seca de raíz al cambiar de la solución con 0 mM a la solución con 70 mM de NaCl. También, el autoinjerto 154/154 y el heteroinjerto Cid/Car mostraron un aumento solo en la longitud de raíz, mientras que 155/155 aumentó únicamente en la materia seca de raíz. Los autoinjertos Car/Car y 154/154 no mostraron

diferencias significativas en longitud de raíz al cambiar de concentración de NaCl en la solución. Es relevante destacar que el heteroinjerto Cid/Car, mostró una tendencia al aumentar la materia seca de la raíz, materia seca aérea y total, así como en el área foliar (aunque no significativamente). En contraste, el heteroinjerto Cid/155 tuvo incrementos significativos ($P \leq 0.05$) en las mismas variables.

Cuadro 7. Comparación de medias de la interacción GENxCON de plantas sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas de jitomate bajo dos concentraciones salinas.

GEN	CON (mM)	MSR (g)	MSA (g)	MST (g)	LR	AF	ALT
Carbonite	0	4.51 b	38.29 a	42.80 a	62.3 b	5.58 a	116.08 a
Carbonite	70	5.13 a	28.28 b	33.41 b	79.7 a	4.75 b	89.51 b
%		-13.74	26.1	21.93	-27.8	14.87	22.88
Car/Car	0	4.17 a	37.07 a	41.24 a	78.31 a	6.05 a	117.45 a
Car/Car	70	4.24 a	24.61 b	28.85 b	53.46 b	4.51 b	85.2 b
%		-1.6	43.42	30	31.73	25.5	27.5
Cid/Car	0	5.94 a	38.74 a	44.68 a	76.16 b	4.50 a	98.96 a
Cid/Car	70	6.29 a	40.71 a	47.01 a	81.49 a	4.92 a	96.23 b
%		-5.89	-5.08	-5.21	-6.99	-9.33	2.75
Cid	0	3.46 a	25.6 a	29.06 a	63.47 a	3.96 a	108.2 a
Cid	70	1.81 b	13.3 b	15.18 b	54.52 b	1.93 b	68.7 b
%		47.7	48.0	47.8	14.1	51.3	36.5
Cid/Cid	0	3.08 a	23.6 a	26.73 a	68.01 a	3.88 a	104.78 a
Cid/Cid	70	1.86 b	13.06b	14.9 b	47.53 b	1.29 b	68.61 b
%		39.6	44.7	44.3	30.1	66.8	34.5
154	0	4.93 b	36.88 a	44.82 a	55.80 a	5.57 a	105.75 a
154	70	5.21 a	34.44 b	39.68 b	51.07 b	2.96 b	71.73 b
%		-5.67	13.6	11.46	8.47	46.9	32.2
154/154	0	4.39 a	34.24 a	38.63 a	60.4 b	5.24 a	92.13 a
154/154	70	4.22 a	20.66 b	26.55 b	67.0 a	3.88 b	67.45 b
%		3.9	39.7	31.27	-10.9	25.9	26.8
Cid/154	0	4.79 a	36.59 a	41.39 a	66.26 a	4.86 a	99.86 a
Cid/154	70	5.01 a	22.48 b	30.63 b	60.4 b	3.47b	77 b
%		-4.59	38.6	25.77	8.8	28.6	22.9
155	0	5.12 b	38.79 a	43.91 a	65.57 b	4.69 a	103.46 a

155	70	6.11 a	31.53 b	37.64 b	73.74 a	3.99 b	86.41 b
%		-19.33	18.71	14.27	-12.5	14.9	16.5
155/155	0	5.48 a	36.86 a	43.91 a	72.37 a	5.11 a	101.56 a
155/155	70	4.01 b	28.65 b	34.22 b	66.76 b	4.08 b	86.38 b
%		26.8	22.27	22.06	7.8	20.15	14.9
Cid/155	0	5.11 b	36.17 b	41.29 b	79.48 a	4.49 b	99.78 a
Cid/155	70	5.57 a	39.28 a	44.86 a	81.71 a	4.75 a	97.16 b
%		-9.0	-8.59	-8.64	-2.8	-5.79	2.62
103	0	3.78 a	32.61 a	38.09 a	61.86 a	3.62 a	81.85 a
103	70	2.44 b	9.85 b	13.86 b	41 b	1.48 b	70.83 b
%		35.44	69.8	63.6	33.7	59.1	13.5
103/103	0	3.80 a	25.2 a	29.0 a	55.28 a	3.47 a	98.91 a
103/103	70	2.71 b	16.75 a	19.4 b	36.15 b	2.94 b	73.16 b
%		28.7	33.53	32.89	34.6	15.3	26.0
Cid/103	0	3.41 a	24.64 a	28.05 a	55.49 a	3.59	94.76
Cid/103	70	2.54 b	11.07 b	13.61 b	24.68 b	1.68	66.93
%		25.5	55.1	51.5	55.62	53.2	29.4

GEN: genotipo, CON: Concentración de NaCl, %: porcentaje de reducción, ALT: altura, AF: área foliar total, MSR: materia seca de raíz, MST: materia seca total, LR: longitud de raíz, DMSH=Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

La aplicación de 70 mM de NaCl a la solución nutritiva en la presente investigación afectó significativamente el crecimiento y desarrollo general de la planta (Cuadro 7), las distintas variables evaluadas disminuyeron severamente la materia seca de raíz (35.44 %); materia seca de la parte aérea (55.1 %), materia seca total (51.5 %), longitud de raíz (55.62 %), área foliar (66.8 %) y la altura (36.5 %) ($\alpha \leq 0.05$). Resultados similares se encontraron en 28 accesiones de *S. galapagense*, 39 de *S. cheesmaniae* y dos cultivares de jitomate (Heinz 1706 y Moneymaker) en la concentración de 200 mM de NaCl; así, las accesiones de poblaciones silvestres tuvieron menor disminución en la producción de biomasa total de la planta bajo estrés salino (Pailles *et al.* 2020). Lo anterior se explica por la alta demanda de energía debido a la elevada fotorrespiración, la síntesis de proteínas y la actividad alterada del transporte de iones (Shi y Theng 2013).

En este estudio el heteroinjerto Cid/155, mostró comportamiento adecuado al presentar reducciones de baja magnitud en materia seca de raíz, materia seca

aérea y total, también el área foliar (aunque estas llegaron a ser significativas); en contraste, Cid/Car, no mostro reducciones significativas en estas variables al cambiar de 0 mM a 70 mM de NaCl. Esté mantenimiento del crecimiento fue debido al sistema de radical más vigoroso que poseen los portainjertos, los cuales permitieron mantener en forma eficiente la absorción de agua y nutrientes (Lee et al., 2010). Otro estudio indica que los portainjertos de jitomate 'DRO-141TX', 'Estamino' y 'Maxifort', exhibieron mayor biomasa aérea y radicular que el cv. 'BHN589' bajo estrés salino (6 dS·m⁻¹) (Bonarota, Kosma & Barrios-Masias, 2022), lo que demuestra que el injerto resulta ser una técnica eficaz para aumentar la tolerancia a varios estreses abióticos (Singh *et al.*, 2020; Bristow *et al.*, 2021).

4.3.2 Concentraciones nutrimentales

El análisis de varianza correspondió al análisis de 56 tratamientos al considerar las combinaciones de concentraciones, genotipos, tipo de injerto y órgano evaluado, esto por el desbalance en el número de repeticiones de los factores que componen los tratamientos. En el Cuadro 8 se observan variación significativa ($\alpha \leq 0.05$) por efecto de estos 56 tratamientos en todos los caracteres evaluados. Los coeficientes de variación, al ser bajos, indican el control adecuado de la variación ambiental y la confiabilidad de los resultados.

Cuadro 8. Análisis de varianza de la concentración nutrimental en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas bajo condiciones de salinidad de 0 y 70 mM.

FV	GL	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cl	Na	S
TRA	55	3.03**	0.03**	2.8**	4.07**	0.060**	1526.73**	0.2**	5.76**	0.03**
BLO	2	0.05	0.001	0.08	0.46**	0.0005	34.14	0.001	0.002	0.001
Error	110	0.02	0.001	0.06	0.08	0.0004	87.83	0.01	0.02	0.001
Total	167									
CV		7.1	4.74	7.1	5.93	11.7	13.99	9.2	5.44	17.9
Media		2.3	0.49	3.4	4.81	0.18	66.97	1.2	2.83	0.12

FV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, TRA: tratamientos, GEN: genotipo, BLO: bloque, CV: coeficiente de variación, N: nitrógeno, P: fósforo, Ca: calcio, Mg: magnesio, Fe: hierro, Cl: cloro, Na: Sodio, S: azufre, ** Altamente significativo con $\alpha \leq 0.001$.

La concentración de NaCl (70 mM) no afectó el contenido de nitrógeno dentro de hojas y tallos de jitomate ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 9). Las hojas presentaron contenido de N que varió entre 3.26 % y 3.45 %, valores que coinciden con lo descrito por Peet (2005). En cuanto a las concentraciones de nutrimentos en tallo, fueron menores ($\alpha \leq 0.05$) que las observadas en las hojas, con variaciones entre 1.21 % y 1.49 %, lo cual se atribuye al rápido crecimiento de la planta y al hecho de que el tallo se considera un órgano estructural de reserva con baja concentración de nitrógeno (Yuan et al., 2007). Además, las plantas bajo condiciones salinas tienden a disminuir la concentración de NO_3^- , debido al antagonismo con el ion Cl^- , donde la absorción de nitratos se ve inhibida por el cloruro y viceversa (Komosa & Górnaiak, 2015). También es posible que, en etapas tempranas, el contenido de nitratos esté relacionado con el crecimiento de las raíces (Wang et al., 2016). Los valores determinados en este estudio concuerdan con lo descrito por Cuadrado-García et al. (2014), quienes encontraron disminuciones en las concentraciones de nitrógeno en el tallo con respecto a las hojas de jitomate.

Öztekin et al. (2009) encontraron diferencias en las concentraciones de nitrógeno en plantas injertadas de jitomate con la variedad Durinta sobre el portainjerto de jitomate Heman; pero al usar el portainjerto Beaufort, no se detectaron diferencias

estadísticas en la absorción de nitrógeno, por lo que el efecto de la salinidad sobre la concentración de nitrógeno depende del portainjerto utilizado.

Cuadro 9. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de nitrógeno en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)	
Car	3.45	a	Car	3.44	a	Car	1.45	b	Car	1.30	b
Car/Car	3.37	a	Car/Car	3.42	a	Car/Car	1.46	b	Car/Car	1.30	b
Cid /Car	3.45	a	Cid /Car	3.28	a	Cid /Car	1.47	b	Cid /Car	1.32	b
154	3.45	a	154	3.29	a	154	1.40	b	154	1.33	b
154/154	3.42	a	154/154	3.32	a	154/154	1.49	b	154/154	1.29	b
Cid/154	3.45	a	Cid/154	3.31	a	Cid/154	1.43	b	Cid/154	1.32	b
155	3.45	a	155	3.42	a	155	1.41	b	155	1.49	b
155/155	3.42	a	155/155	3.31	a	155/155	1.35	b	155/155	1.44	b
Cid/155	3.42	a	Cid/155	3.26	a	Cid/155	1.45	b	Cid/155	1.35	b
103	3.42	a	103	3.35	a	103	1.46	b	103	1.36	b
103/103	3.44	a	103/103	3.26	a	103/103	1.48	b	103/103	1.44	b
Cid/103	3.39	a	Cid/103	3.38	a	Cid/103	1.45	b	Cid/103	1.48	b
Cid	3.38	a	Cid	3.37	a	Cid	1.42	b	Cid	1.35	b
Cid/Cid	3.44	a	Cid/Cid	3.42	a	Cid/Cid	1.21	b	Cid/Cid	1.4	b
DMS	0.27										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de nitrógeno en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

La concentración de fósforo incrementó por efecto de la sal ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 10). En hoja los tratamientos Cid/154, 154, 154/154, Car, Cid/Car, Car/Car, 155, Cid/155 y 155/155 bajo salinidad, tuvieron concentraciones más altas de fósforo, mientras que, en tallo, el genotipo 154 sin injertar, autoinjertado y heteroinjertado tuvo concentraciones mayores de fósforo bajo estrés salino ($\alpha \leq 0.05$) en comparación con el híbrido Cid F1, lo que sugiere la eficiente absorción de fósforo por parte de las raíces de los portainjertos tolerantes (Semíz & Suarez, 2015). Estos resultados difieren con lo descrito por Jones (1999), quien menciona valores normales de concentración de fósforo en un rango de 0.4 a 0.7% para

hoja. De manera similar, Chaichi et al. (2017) mencionan que los contenidos de fósforo en plantas de jitomate bajo estrés salino fueron mayores que en las no salinizadas, y atribuyen esta condición al desequilibrio iónico que ocurre bajo condiciones de estrés debido a la presencia de iones Na^+ y Cl^- (Chaichi et al., 2017). Además, se ha demostrado que, bajo condiciones de estrés salino, hubo una mejora en la concentración de fósforo en el vástago del cv. Big Dena injertado sobre 'Maxifort' tolerante a la sal (Semíz & Suarez, 2015). Sin embargo, en otro estudio se encontraron disminuciones en la concentración de fósforo en hojas de jitomate expuestas a 50 mM de NaCl, debido al papel antagónico del sodio con otros elementos (Habibi et al., 2023).

Cuadro 10. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de fósforo en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)	
Car	0.395	p-s	Car	0.515	hij	Car	0.631	ef	Car	0.522	hi
Car/Car	0.380	p-t	Car/Car	0.447	mno	Car/Car	0.552	gh	Car/Car	0.599	f
Cid /Car	0.367	stu	Cid /Car	0.5	ijk	Cid /Car	0.561	g	Cid /Car	0.514	hij
154	0.370	r-u	154	0.547	gh	154	0.545	gh	154	0.647	cde
154/154	0.380	p-t	154/154	0.56	g	154/154	0.737	a	154/154	0.742	a
Cid/154	0.371	r-u	Cid/154	0.561	g	Cid/154	0.728	a	Cid/154	0.674	bcd
155	0.382	p-t	155	0.469	klm	155	0.708	ab	155	0.526	ghi
155/155	0.377	q-t	155/155	0.453	lmn	155/155	0.623	ef	155/155	0.56	g
Cid/155	0.367	stu	Cid/155	0.467	klm	Cid/155	0.677	bc	Cid/155	0.494	ijk
103	0.361	stu	103	0.351	tu	103	0.491	i-l	103	0.416	nop
103/103	0.377	q-t	103/103	0.407	pqr	103/103	0.465	klm	103/103	0.467	klm
Cid/103	0.378	q-t	Cid/103	0.378	q-t	Cid/103	0.463	klm	Cid/103	0.473	klm
Cid	0.406	pqr	Cid	0.336	u	Cid	0.683	bc	Cid	0.474	klm
Cid/Cid	0.412	opq	Cid/Cid	0.348	tu	Cid/Cid	0.639	de	Cid/Cid	0.481	j-m
DMS	0.03										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de fósforo en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

La concentración de NaCl disminuyó el contenido de K^+ en ambos órganos ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 11). Las concentraciones en hoja concuerdan con lo descrito por Peet (2005), quien indica que los valores normales de concentración de K están entre 2 % y 4 %. Los tratamientos Cid/154, 154, 154/154, Car, Cid/Car, Car/Car, 155, Cid/155 y 155/155 bajo condición salina tuvieron mayor concentración de fósforo en hoja; mientras que el genotipo 155 sin injertar, autoinjertado y heteroinjertado, también presentó concentraciones de fósforo más altas en tallo respecto al Cid. Estos resultados coinciden con otras investigaciones donde se observó la disminución del contenido de K^+ en hojas de jitomate del cv. Bark bajo condiciones de salinidad (100 mM, $7.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) (Abdeldym et al., 2020). Esta situación se atribuye a la competencia generada entre iones Na^+ y K^+ debido a su similitud en cargas iónicas, lo que resulta en la competencia por los sitios de unión de enzimas que dependen del K^+ para su activación (Munns & Tester, 2008). Resultados similares también fueron encontrados por Al-Karaki (2000), al observar disminuciones en los contenidos de K^+ en los vástagos de los cultivares Sera, 898 y Rohaba bajo solución salina con 72, 144 y 216 mM de NaCl.

Cuadro 11. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de potasio en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)	
Car	5.24	a	Car	4.29	ef	Car	3.87	gh	Car	2.57	t-x
Car/Car	4.1	fg	Car/Car	3.68	h-k	Car/Car	3.61	h-l	Car/Car	2.58	t-x
Cid	4.12	fg	Cid	3.65	h-l	Cid /Car	3.82	ghi	Cid	2.52	t-x
/Car			/Car						/Car		
154	4.71	bcd	154	3.75	g-k	154	3.19	m-q	154	2.56	t-x
154/154	4.48	c-f	154/154	3.75	g-k	154/154	3.26	l-p	154/154	2.63	s-x
Cid/154	4.62	b-e	Cid/154	3.58	h-m	Cid/154	3.74	g-k	Cid/154	2.44	t-x
155	4.62	b-e	155	3.59	h-l	155	3.68	h-k	155	2.71	s-w
155/155	4.64	b-e	155/155	3.79	g-j	155/155	3.43	i-n	155/155	2.79	r-u
Cid/155	4.44	c-f	Cid/155	3.42	j-n	Cid/155	3.11	n-r	Cid/155	2.81	q-t
103	4.92	ab	103	2.98	p-s	103	3.50	h-n	103	2.40	u-x
103/103	4.4	def	103/103	3	o-s	103/103	3.62	h-l	103/103	2.32	wxy
Cid/103	4.59	b-e	Cid/103	2.72	r-v	Cid/103	3.42	j-n	Cid/103	2.32	xy
Cid	4.81	bc	Cid	2.24	xy	Cid	3.38	k-o	Cid	1.94	y
Cid/Cid	4.78	bcd	Cid/Cid	2.38	vwx	Cid/Cid	3.68	h-k	Cid/Cid	1.96	y
DMS	0.39										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de potasio en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Con respecto a la concentración de Ca^{2+} , hubo aumento significativo bajo estrés salino en todos los tratamientos ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 12). En cuanto a hoja, los tratamientos Cid/155, 155/155, 155, Cid/154 y 154/154 tuvieron una mayor concentración de calcio bajo estrés salino. En el caso del tallo, las mayores concentraciones de calcio se obtuvieron en los tratamientos Cid/Car, 154, 154/154, Cid/154, 155, 155/155, Cid/155, 103 y 103/103 bajo condiciones de salinidad. Estos valores se encuentran dentro del rango normal de 0.2 % a 5.9 % del peso seco para la concentración de calcio en tejidos vegetales (Jones, 1999).

La salinidad puede modificar la expresión y actividad de transportadores de nutrientes en las raíces y en otras partes de la planta (Dodd, Kudla & Sanders, 2010). Estos cambios incrementan la absorción y movilización de calcio hacia los

tejidos donde se necesita para mitigar los efectos del estrés salino, esto permite a las plantas tolerantes mantener concentraciones altas de Ca^{2+} en hojas con crecimiento activo (Di Gioia et al., 2013). Resultados similares fueron obtenidos por Al-Harbi, Hejazi & Omram (2016) al utilizar 'Unifort' como portainjerto tolerante a NaCl, el cual restringe la absorción de Na^+ y Cl^- hacia el vástago e incrementa la acumulación de Ca^{2+} en las vacuolas del vástago de plantas injertadas bajo estrés salino. Esto es debido a la señalización de sensores de estrés osmótico como el gen OSCA_1 que altera la señalización de Ca^{2+} en células de la raíz, lo que resulta en el cierre estomático y crecimiento de las raíces como respuesta al estrés osmótico generado por la alta concentración de Na^+ y Cl^- (Jiang et al., 2019). Situación similar fue observada en el cultivar 'Cuore di Bue' injertado sobre 'Maxifort', 'Arnold' y 'Armstrong', tuvieron concentraciones mayores de Ca^{2+} y Na^+ compartimentalizados en mesófilos de hoja ante condiciones salinas, lo que permite mantener o alcanzar la homeostasis iónica (Di Gioia et al., 2013).

Cuadro 12. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de calcio en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 Mm			70 mM		
TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)	
Car	4.5	jkl	Car	5.26	ghi	Car	3.2	stu	Car	5.3	f-i
Car/Car	4.6	jkl	Car/Car	5.56	efg	Car/Car	3.33	r-u	Car/Car	5.2	ghi
Cid /Car	4.4	lm	Cid /Car	5.75	def	Cid /Car	3.63	p-s	Cid /Car	6.6	a
154	4.66	jkl	154	5.35	fgh	154	3.23	r-u	154	6.35	ab
154/154	3.93	n-q	154/154	6.03	bcd	154/154	3.06	u	154/154	6.51	a
Cid/154	4.36	lmn	Cid/154	6.33	ab	Cid/154	3.16	tu	Cid/154	6.66	a
155	4.66	jkl	155	6.31	ab	155	3.66	p-r	155	6.4	ab
155/155	4.63	jkl	155/155	6.48	ab	155/155	3.56	q-t	155/155	6.6	a
Cid/155	4.43	klm	Cid/155	6.58	a	Cid/155	3.26	r-u	Cid/155	6.4	ab
103	3.9	opq	103	5.7	d-g	103	3.3	r-u	103	6.3	abc
103/103	4.03	m-p	103/103	4.86	ijk	103/103	3.3	r-u	103/103	5.85	cde
Cid/103	3.13	tu	Cid/103	5.58	d-g	Cid/103	3.83	opq	Cid/103	5.25	ghi
Cid	4.5	jkl	Cid	4.5	jkl	Cid	3.33	r-u	Cid	4.9	hij
Cid/Cid	4.93	hij	Cid/Cid	4.28	l-o	Cid/Cid	3.56	q-t	Cid/Cid	4.5	jkl
DMS	0.46										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de calcio en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

En hoja, la concentración de Mg^{2+} en la planta disminuyó ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 13) ante el estrés salino, lo cual ubicó a todos los tratamientos bajo esta condición en deficiencia de este nutrimento. Al considerar la concentración de Mg^{2+} en hojas, los tratamientos 154, 154/154, Cid/154, 155, 155/155, Cid/ 155, Car, Car/Car y Cid/Car absorbieron más Mg^{2+} bajo salinidad. Aunque hubo diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha \leq 0.05$), en tallo no se mostró una tendencia clara sobre las concentraciones de Mg^{2+} por la condición salina.

Las concentraciones de magnesio en hojas de los tratamientos sin NaCl en la solución nutritiva, coinciden con Peet (2005) quien señala concentraciones de 0.30 a 0.80 en el rango normal, esto podría explicarse por la rápida absorción del ion Na^+ , mientras que el Fe^+ es de absorción lenta; es decir, hubo absorción desigual de cationes, producto de un efecto antagónico entre ambos (Mengel &

Kirkby, 2000). Los resultados obtenidos concuerdan con los de Savvas et al. (2011), quienes encontraron deficiencias de Mg^{2+} en hojas de injertos de jitomate en condiciones de 22 y 45 mM de NaCl.

Cuadro 13. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de magnesio en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)	
Car	0.42	bc	Car	0.25	hij	Car	0.08	p-t	Car	0.08	o-r
Car/Car	0.38	de	Car/Car	0.20	kl	Car/Car	0.06	p-w	Car/Car	0.08	pqr
Cid	0.42	bc	Cid /Car	0.25	ij	Cid	0.08	pqr	Cid	0.04	s-w
/Car						/Car			/Car		
154	0.44	ab	154	0.28	gh	154	0.08	p-t	154	0.04	s-w
154/154	0.38	d	154/154	0.22	jk	154/154	0.08	pqr	154/154	0.06	p-w
Cid/154	0.39	cd	Cid/154	0.23	jk	Cid/154	0.09	op	Cid/154	0.08	p-u
155	0.4	cd	155	0.26	hi	155	0.07	p-v	155	0.06	p-w
155/155	0.47	a	155/155	0.21	k	155/155	0.09	opq	155/155	0.06	p-w
Cid/155	0.41	bcd	Cid/155	0.27	hi	Cid/155	0.08	p-s	Cid/155	0.06	p-w
103	0.4	cd	103	0.16	m	103	0.06	q-w	103	0.05	r-w
103/103	0.31	g	103/103	0.13	mn	103/103	0.06	q-w	103/103	0.05	r-w
Cid/103	0.32	fg	Cid/103	0.07	p-v	Cid/103	0.04	vw	Cid/103	0.04	t-w
Cid	0.34	ef	Cid	0.09	op	Cid	0.05	r-w	Cid	0.04	uvw
Cid/Cid	0.40	cd	Cid/Cid	0.12	no	Cid/Cid	0.03	w	Cid/Cid	0.05	r-w
DMS	0.03										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de magnesio en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Las concentraciones de hierro en hojas tuvieron un incremento significativo, mientras que, en tallo disminuyeron ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 14) debido al estrés salino. En hoja y tallo, los tratamientos Cid/154, 154, 154/154, 155, Cid/155, 155/155, Car, Cid/Car, Car/Car y Cid, 103, tuvieron las concentraciones de Fe^{2+} más altas bajo condiciones de salinidad. Las concentraciones se encuentran dentro del rango de suficiencia (40-100 $mg\ kg^{-1}$) de materia seca, de acuerdo con Peet (2005).

Estos resultados difieren de lo reportado por Orosco-Alcalá (2008), quien no encontró diferencias significativas en la concentración de hierro en las hojas del híbrido 'Caíman' bajo estrés salino, incluso cuando estaba injertado sobre los portainjertos 'Multifort', 'Maxifort' y 'Beaufort'.

Cuadro 14. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de hierro en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	CON (mg kg ⁻¹)		TRA	CON (mg kg ⁻¹)		TRA	CON (mg kg ⁻¹)		TRA	CON (mg kg ⁻¹)	
Car	67.23	i-m	Car	106.50	bc	Car	67.23	i-m	Car	48.40	o-s
Car/Car	91.77	c-g	Car/Car	94.83	b-e	Car/Car	91.77	c-g	Car/Car	44.50	o-t
Cid /Car	83.63	d-h	Cid /Car	96.93	bcd	Cid /Car	83.63	d-h	Cid /Car	53.20	m-p
154	71.33	h-l	154	101.13	bc	154	71.33	h-l	154	53.26	m-p
154/154	48.43	o-s	154/154	97.20	bcd	154/154	52.73	m-q	154/154	47.83	o-s
Cid/154	44.97	o-t	Cid/154	130.67	a	Cid/154	48.43	o-s	Cid/154	45.80	o-t
155	85.30	d-h	155	81.30	e-i	155	44.97	o-t	155	37.90	q-t
155/155	59.50	k-o	155/155	107.53	b	155/155	51.97	n-r	155/155	46.26	o-t
Cid/155	77.37	g-j	Cid/155	94.40	b-f	Cid/155	59.50	k-o	Cid/155	44.66	o-t
103	64.00	j-n	103	70.40	h-l	103	74.03	h-k	103	32.03	t
103/103	51.30	n-r	103/103	57.50	l-o	103/103	64.00	j-n	103/103	33.73	st
Cid/103	53.33	m-p	Cid/103	91.50	c-g	Cid/103	56.30	l-o	Cid/103	40.56	p-t
Cid	96.33	b-e	Cid	76.93	g-j	Cid	56.67	l-o	Cid	37.46	rst
Cid/Cid	63.90	j-n	Cid/Cid	79.50	f-i	Cid/Cid	83.00	d-h	Cid/Cid	34.76	st
DMS	15.16										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de hierro en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Bajo estrés salino, las concentraciones de Cl⁻ en hoja y tallo (Cuadro 15) incrementaron ($\alpha \leq 0.05$). En hoja las concentraciones más altas de Cl⁻ se tuvieron en los tratamientos Cid y su autoinjerto en condiciones de salinidad. Para tallo, el Cid, Cid/Cid, Cid/103 y 103/103 fueron los tratamientos con más alta concentración de Cl⁻ bajo estrés salino. Datos que se ubican dentro del rango de

suficiencia para especies tolerantes (15 a 50 mg·g⁻¹) (Xu et al., 1999). Los valores obtenidos concuerdan con otros estudios donde encontraron incrementos significativos de cloro en hojas del cv. Belladona F1 injertadas sobre ‘Beaufort’, ‘He-Man’ y ‘Resistar’ bajo condiciones salinas en 22 y 45 mM de cloruro de sodio (Savvas et al., 2011).

Cuadro 15. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de cloro en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Concentración de Cl (%)											
Hoja						Tallo					
0 mM			70 Mm			0 mM			70 mM		
TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)	
Carbonite	1.4	lmn	Carbonite	2.433	ef	Carbonite	1.26	n-r	Carbonite	1.66	i-l
Car/Car	1.37	mno	Car/Car	2.518	ef	Car/Car	1.00	rs	Car/Car	1.60	j-m
Cid /Car	1.33	m-p	Cid /Car	3.609	b	Cid /Car	1.10	o-s	Cid /Car	1.78	ij
154	1.23	n-r	154	2.582	e	154	1.03	qrs	154	1.72	ijk
154/154	1.33	m-p	154/154	3.482	bc	154/154	1.10	o-s	154/154	1.78	ij
Cid/154	1.1	o-s	Cid/154	2.485	ef	Cid/154	1.07	p-s	Cid/154	1.78	ij
155	1.3	n-q	155	3.254	c	155	1.00	rs	155	1.89	hi
155/155	1.4	lmn	155/155	2.914	d	155/155	0.93	s	155/155	1.78	ij
Cid/155	1.4	lmn	Cid/155	2.544	e	Cid/155	1.00	rs	Cid/155	1.72	ijk
103	1.43	k-n	103	2.544	e	103	1.03	qrs	103	1.36	mno
103/103	1.23	n-r	103/103	3.329	bc	103/103	0.90	s	103/103	2.08	gh
Cid/103	1.37	mno	Cid/103	2.367	ef	Cid/103	1.00	rs	Cid/103	2.25	fg
Cid	1.27	n-r	Cid	4.544	a	Cid	1.27	n-r	Cid	2.32	efg
Cid/Cid	1.17	n-s	Cid/Cid	4.367	a	Cid/Cid	1.07	p-s	Cid/Cid	2.30	efg
DMS	0.28										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de cloro en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Las concentraciones de sodio en hojas y tallos de jitomate tuvieron un aumento significativo ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 16) debido al estrés salino. En hoja, los tratamientos Carbonite, Car/Car, 154, 154/154, Cid/154, 103, 103/103, Cid/103, Cid y Cid/Cid

bajo salinidad tuvieron las concentraciones más elevadas de Na^+ . En cuanto a tallo, los tratamientos Carbonite, Car/Car, Cid /Car, 154, 154/154, Cid, Cid/Cid tuvieron mayor concentración de Na^+ en condiciones de estrés salino. Estudios anteriores han reportado resultados similares. Por ejemplo, en el caso de 'Cuore Di Bue' injertado sobre los portainjertos 'Arnold' y 'Amstrong' y 'Maxifort', hubo un aumento en la concentración de Na^+ en hojas en una solución con 20 mM de NaCl, sin alcanzar niveles tóxicos (Di Gioia et al., 2013). Esto podría explicarse por la capacidad de las plantas para regular la compartimentalización del Na^+ en el vástago a nivel celular e intracelular para evitar que el Na^+ llegará a concentraciones tóxicas en el citoplasma de las células del mesófilo (Albacete et al., 2009, Munns & Tester, 2008). Además, Öztekin et al. (2009) mencionaron aumentos en la concentración de Na^+ en las hojas de 'Durinta' injertada sobre Heman y Beaufort en una concentración de $8.8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. En contraste, en otro estudio se observó una disminución en la concentración de Na^+ en el vástago de 'Faridah' debido al injerto con el portainjerto 'Unifort', lo que podría explicarse por la capacidad de las raíces del portainjerto para excluir los iones Na^+ por traslocación de Na^+ por K^+ su inclusión en las vacuolas radicales (Edelstein et al., 2016). Las plantas autoinjertadas y no injertadas de los portainjertos Carbonite, 154 y 155, presentan mayor valor en las concentraciones de Na^+ con respecto a los heteroinjertos, por lo que, el efecto de la incisión no influye sobre la restricción en el transporte de iones de sal a las hojas, pero los resultados sugieren que el injerto sobre portainjertos tolerantes pueden influir en el transporte de hormonas vegetales entre raíz y vástago, lo que puede alterar la tolerancia a sal de la planta utilizada como injerto (Aloni et al., 2008).

Cuadro 16. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de sodio en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 Mm			0 mM			70 mM		
TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)	
Carbonite	1.18	U	Carbonite	4.14	GHI	Carbonite	1.51	T	Carbonite	4.65	BC
Car/Car	1.18	U	Car/Car	4.33	D-G	Car/Car	1.67	RST	Car/Car	4.29	EFG
Cid /Car	1.04	UV	Cid /Car	3.63	L	Cid /Car	1.57	T	Cid /Car	3.63	L
154	1.91	O-R	154	4.45	C-F	154	1.56	T	154	4.51	CDE
154/154	2.16	N	154/154	4.55	CD	154/154	1.50	T	154/154	4.85	B
Cid/154	1.08	UV	Cid/154	4.23	FGH	Cid/154	1.49	T	Cid/154	3.63	L
155	0.87	V	155	3.68	KL	155	1.63	T	155	3.82	JKL
155/155	0.89	V	155/155	3.71	KL	155/155	1.51	T	155/155	3.75	JKL
Cid/155	0.58	W	Cid/155	3.21	M	Cid/155	1.65	ST	Cid/155	3.15	M
103	1.94	N-Q	103	4.15	GHI	103	2.15	NO	103	3.25	M
103/103	1.61	T	103/103	4.33	D-G	103/103	1.90	PQR	103/103	3.90	IJK
Cid/103	1.15	U	Cid/103	4.26	FG	Cid/103	1.71	Q-T	Cid/103	3.99	HIJ
Cid	1.90	P-S	Cid	4.33	D-G	Cid	2.00	NOP	Cid	5.31	A
Cid/Cid	2.08	NOP	Cid/Cid	4.37	D-G	Cid/Cid	2.06	NOP	Cid/Cid	5.35	A
DMS	0.24										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de sodio en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

En hoja y tallo de los tratamientos hubo diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$, Cuadro 17) para la concentración de azufre, debido a la salinidad. En hoja, los tratamientos Carbonite, Car/Car, Cid /Car, 154 y 155 tuvieron las concentraciones más altas bajo estrés salino, mientras que en tallo no hubo diferencias significativas ($\alpha \leq 0.05$) en los tratamientos con respecto a las concentraciones de NaCl. Además, concuerda con otro estudio, donde se observó que el contenido de azufre en hojas de plantas injertadas bajo estrés salino fue mayor que en aquellas no expuestas a la salinidad, lo cual se atribuye al desequilibrio iónico

generado por la presencia de iones de Ca^{2+} y K^{+} , según lo planteado por Nedjimi y Dadoud (2009).

Cuadro 17. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la concentración de azufre en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)		TRA	CON (%)	
Carbonite	0.267	d	Carbonite	0.212	ef	Carbonite	0.055	jk	Carbonite	0.041	jk
Car/Car	0.201	f	Car/Car	0.186	fg	Car/Car	0.058	jk	Car/Car	0.035	jk
Cid /Car	0.222	ef	Cid /Car	0.191	fg	Cid /Car	0.067	j	Cid /Car	0.030	jk
154	0.364	bc	154	0.192	fg	154	0.036	jk	154	0.037	jk
154/154	0.334	c	154/154	0.139	hi	154/154	0.052	jk	154/154	0.039	jk
Cid/154	0.360	bc	Cid/154	0.148	hi	Cid/154	0.034	jk	Cid/154	0.037	jk
155	0.375	ab	155	0.163	g	155	0.029	k	155	0.034	jk
155/155	0.37	abc	155/155	0.121	i	155/155	0.042	jk	155/155	0.049	jk
Cid/155	0.405	a	Cid/155	0.122	i	Cid/155	0.042	jk	Cid/155	0.021	k
103	0.247	de	103	0.144	hi	103	0.035	jk	103	0.023	k
103/103	0.196	fg	103/103	0.118	i	103/103	0.025	k	103/103	0.039	jk
Cid/103	0.202	f	Cid/103	0.112	i	Cid/103	0.04	jk	Cid/103	0.056	jk
Cid	0.260	d	Cid	0.148	hi	Cid	0.043	jk	Cid	0.043	jk
Cid/Cid	0.211	ef	Cid/Cid	0.117	i	Cid/Cid	0.049	jk	Cid/Cid	0.049	jk
DMS	0.03										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de azufre en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Las comparaciones de grupos por contrastes indican que existe diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre concentraciones de salinidad para todas las variables a excepción de Hierro (Cuadro 18). De igual manera esto se observó al hacer las comparaciones ortogonales entre hoja y tallo, donde todas las variables mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Cuadro 18. Contrastes del efecto por cloruro de sodio sobre la concentración nutrimental en plantas sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas por concentración y órgano.

0 VS 70 mM de NaCl				HOJA VS TALLO			
VAR	Q	CME		VAR	Q	CME	
N	1.909	0.1953	*	N	55.68	166.1	**
P	3.086	0.5101	**	P	0.985	0.052	**
K	36.53	71.501	**	K	30.1	48.536	**
Ca	-53.3	152.6	**	Ca	8.91	4.2593	**
Mg	2.843	0.433	**	Mg	6.485	2.2528	**
Fe	-22.7	27.767	NS	Fe	738.7	29238	**
Cl	-35.8	68.947	**	Cl	20.55	22.638	**
Na	-71.9	278.32	**	Na	-5.07	1.38	**
S	1.934	0.2003	**	S	4.986	1.332	**

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de fósforo en porcentaje de materia seca, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, NS= No significativo, * Significativo con $\alpha \leq 0.05$, ** Significativo con $\alpha \leq 0.001$.

De acuerdo con los contrastes para grupos de tratamientos (Cuadro 19), se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre autoinjertos y heteroinjertos en las variables Ca, Fe y Na, los demás elementos no presentaron diferencias; para la comparación entre autoinjertos y genotipos sin injertar se encontraron diferencias para las variables K y Na; mientras que, para las demás variables no se identificaron diferencias. Por último, para los grupos entre heteroinjertos y genotipos sin injertar, los elementos; K, Mg, Na y S, presentaron diferencias significativas, mientras que para las demás variables no se presentaron diferencias.

Cuadro 19. Contrastes del efecto por cloruro de sodio sobre la concentración nutrimental en grupos plantas sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Contraste	Autoinjertos VS Heteroinjertos			Autoinjertos Vs sin injertar			Heteroinjertos VS Sin injertar		
Nutrient	Q	CME		Q	CME		Q	CME	
o									
N	-0.03	8x10 ⁻⁵	NS	-0.33	0.008	NS	-0.25	0.005	NS
P	-0.12	0.0015	NS	-0.05	0.000	NS	-0.03	9x10 ⁻⁵	NS
K	0.987	0.0913	NS	-2.49	0.465	**	-3.62	1.228	**
Ca	-2.51	0.593	**	-0.45	0.015	NS	1.65	0.255	NS
Mg	0.088	7x10 ⁻⁴	NS	-0.18	0.002	NS	-0.33	0.010	**
Fe	-64	384.4	*	-41.7	130.6	NS	-28.5	76.32	NS
3									
Cl	0.854	0.068	NS	1.112	0.092	NS	0.756	0.053	NS
Na	6.13	3.52	**	0.08	1.07	**	-5.38	2.72	**
S	-0.08	0.000	NS	-0.32	0.007	**	-0.17	0.002	*

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de fósforo en porcentaje de materia seca, Q: Estimación, Car: portainjerto Carbonite, 103: portainjerto 103, 154: portainjerto 154, 155: portainjerto 155, Cid: El Cid F1, NS= No significativo, * Significativo con $\alpha \leq 0.05$, ** Significativo con $\alpha \leq 0.001$.

Las relaciones K/Na, Ca/Na y Mg/Na en hoja y tallo de jitomate, generalmente son mayores cuando las plantas se mantuvieron a 0 mM de concentración de NaCl respecto a la concentración de 70 mM (Cuadro 20, 21 y 22). Estas relaciones son más bajas en las plantas estresadas por la salinidad debido a una mayor acumulación de Na⁺, lo que provocó un desequilibrio iónico (Irshad et al., 2009). Bajo estrés salino, el Na⁺ funciona como un ion tóxico que compite con K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ en la célula, induciendo toxicidad iónica y desequilibrio en la homeostasis iónica, lo que podría causar daños irreversibles en la morfología de la planta, además del estrés osmótico (Yin et al., 2013; Hundare et al., 2022). Los valores mayores de las relaciones en hojas y tallos de las plantas expuestas a 70 mM, se debe a una mayor absorción de K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺, como una respuesta de regulación en la absorción de Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg⁺ para disminuir los desequilibrios iónicos en las plantas sometidas a estrés salino (Di Gioia et al.,

2013). Estos resultados coinciden con los indicados por Al-karaki (2008) que mencionan disminución en la proporción K/Na de los brotes de jitomate evaluados al incrementar la concentración de NaCl, del mismo modo, Zhang et al (2023) en hojas y raíces de jitomate. Resultados similares menciona Mutalejoan et al (2021) con 80 mM de NaCl y Ren et al (2020) reportan que se redujeron las proporciones de K/Na en raíces y brotes por estrés salino.

Además, las proporciones K/Na, Ca/Na y Mg/Na son mayores en hojas que en tallo, esto podría explicarse dado que en las hojas son órganos fuente-demanda mientras que el tallo es el órgano de transporte de las raíces a las hojas.

En las tres relaciones, cuando las plantas fueron sometidas a 0 y a 70 mM, las hojas y el tallo del injerto Cid/155 tuvieron la mayor proporción, incluso mayor que el autoinjerto 155/155 y el genotipo 155 sin injertar, lo que indica que el portainjerto 155 es el más tolerantes a Na^+ , y que al injertarlo con un genotipo susceptible tiene la capacidad de incrementar la tolerancia al NaCl en éste, por lo que es un portainjerto con la capacidad de limitar los desequilibrios iónicos en condiciones de salinidad. Por el contrario, las proporciones más bajas se presentaron en 'El Cid F1' y en el autoinjerto Cid/Cid, indicando que este híbrido es sensible a la sal, dado que la absorción de Na^+ supero drásticamente a los cationes K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Albacete et al., 2009; Santa-Cruz et al., 2002).

El principal factor que contribuye al estrés iónico y la sensibilidad al estrés salino es casi exclusivamente atribuible a la acumulación excesiva de Na^+ y a la deficiencia de K^+ especialmente en las partes aéreas de las plantas, ya que el K^+ activa más de 50 enzimas en la planta, y no puede ser sustituido por el Na^+ (Tester, 2003). Albacete et al., (2009) encontraron evidencia sobre la capacidad de las plantas injertadas para disminuir los desbalances K/Na bajo condiciones de salinidad. Por lo tanto, los mecanismos de absorción y traslocación de Na^+ y K^+ son claves para la supervivencia de las plantas en ambientes salinos (Wu, 2018).

Cuadro 20. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la relación K/Na en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas.

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	K/Na		TRA	K/Na		TRA	K/Na		TRA	K/Na	
Carbonite	4.47	c	Carbonite	1.04	op	Carbonite	2.58	fgh	Carbonite	0.55	q-w
Car/Car	3.49	e	Car/Car	0.85	o-s	Car/Car	2.17	h-l	Car/Car	0.60	p-w
Cid /Car	3.98	d	Cid /Car	1.01	op	Cid /Car	2.44	f-j	Cid /Car	0.70	o-w
154	2.49	f-j	154	0.85	o-s	154	2.05	j-n	154	0.57	q-w
154/154	2.08	i-m	154/154	0.83	o-t	154/154	2.19	h-l	154/154	0.54	q-w
Cid/154	4.28	cd	Cid/154	0.85	o-s	Cid/154	2.51	f-i	Cid/154	0.67	o-w
155	5.32	b	155	0.98	opq	155	2.26	g-k	155	0.71	o-v
155/155	5.28	b	155/155	1.02	op	155/155	2.27	g-k	155/155	0.75	o-u
Cid/155	7.67	a	Cid/155	1.07	o	Cid/155	1.89	k-n	Cid/155	0.89	o-r
103	2.54	fgh	103	0.72	o-v	103	1.63	n	103	0.54	r-w
103/103	2.73	f	103/103	0.69	o-w	103/103	1.91	k-n	103/103	0.40	t-w
Cid/103	4.02	d	Cid/103	0.64	o-w	Cid/103	1.99	k-n	Cid/103	0.33	uvw
Cid	2.68	fg	Cid	0.45	s-w	Cid	1.70	mn	Cid	0.29	vw
Cid/Cid	2.31	f-k	Cid/Cid	0.45	s-w	Cid/Cid	1.80	lmn	Cid/Cid	0.26	w
DMS	0.42										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de fósforo en porcentaje de materia seca, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra dentro de columnas no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Cuadro 21. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la relación Ca/Na en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	Ca/Na		TRA	Ca/Na		TRA	Ca/Na		TRA	Ca/Na	
Carbonite	3.82	c	Carbonite	1.27	t-w	Carbonite	2.13	e-k	Carbonite	1.06	w
Car/Car	3.93	c	Car/Car	1.29	s-w	Car/Car	2.01	h-m	Car/Car	1.05	w
Cid /Car	4.24	c	Cid /Car	1.59	m-u	Cid /Car	2.32	d-i	Cid /Car	1.83	j-o
154	2.48	d-g	154	1.20	uvw	154	2.08	f-l	154	1.41	o-w
154/154	1.84	j-o	154/154	1.33	p-w	154/154	2.06	g-l	154/154	1.34	p-w
Cid/154	4.08	c	Cid/154	1.50	o-v	Cid/154	2.12	e-k	Cid/154	1.84	j-o
155	5.35	b	155	1.72	k-s	155	2.25	e-j	155	1.68	l-t
155/155	5.26	b	155/155	1.75	k-r	155/155	2.37	d-i	155/155	1.76	k-p
Cid/155	7.60	a	Cid/155	2.05	g-l	Cid/155	1.98	h-m	Cid/155	2.03	h-l
103	2.00	h-m	103	1.38	p-w	103	1.54	n-v	103	1.94	i-n
103/103	2.53	de	103/103	1.13	vw	103/103	1.74	k-r	103/103	1.50	n-v
Cid/103	2.74	d	Cid/103	1.31	r-w	Cid/103	2.24	e-j	Cid/103	1.32	q-w
Cid	2.50	def	Cid	1.04	w	Cid	1.67	l-t	Cid	1.00	w
Cid/Cid	2.38	d-h	Cid/Cid	0.98	w	Cid/Cid	1.75	k-q	Cid/Cid	0.98	w
DMS	0.43										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de fósforo en porcentaje de materia seca, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Cuadro 22. Efecto del cloruro de sodio (70 mM) en la relación Mg/Na en hojas y tallos de plantas de jitomate sin injertar, autoinjertadas y heteroinjertadas

Hoja						Tallo					
0 mM			70 mM			0 mM			70 mM		
TRA	Mg/Na		TRA	Mg/Na		TRA	Mg/Na		TRA	Mg/Na	
Carbonite	0.364	e	Carbonite	0.063	j-m	Carbonite	0.053	j-p	Carbonite	0.018	q-t
Car/Car	0.325	f	Car/Car	0.047	j-s	Car/Car	0.039	k-t	Car/Car	0.020	o-t
Cid /Car	0.407	d	Cid /Car	0.070	jk	Cid /Car	0.054	j-o	Cid /Car	0.013	rst
154	0.234	h	154	0.065	jkl	154	0.051	j-q	154	0.011	t
154/154	0.180	i	154/154	0.049	j-q	154/154	0.056	j-n	154/154	0.014	rst
Cid/154	0.369	e	Cid/154	0.055	j-n	Cid/154	0.065	jkl	Cid/154	0.022	n-t
155	0.460	c	155	0.073	jk	155	0.047	j-r	155	0.018	q-t
155/155	0.534	b	155/155	0.075	j	155/155	0.063	j-m	155/155	0.018	q-t
Cid/155	0.708	a	Cid/155	0.067	jk	Cid/155	0.050	j-q	Cid/155	0.021	n-t
103	0.208	hi	103	0.041	j-t	103	0.028	m-t	103	0.017	q-t
103/103	0.195	i	103/103	0.032	l-t	103/103	0.032	l-t	103/103	0.013	rst
Cid/103	0.283	g	Cid/103	0.027	n-t	Cid/103	0.025	n-t	Cid/103	0.012	st
Cid	0.194	i	Cid	0.023	n-t	Cid	0.027	n-t	Cid	0.008	t
Cid/Cid	0.194	i	Cid/Cid	0.018	q-t	Cid/Cid	0.019	p-t	Cid/Cid	0.010	t
DMS	0.03										

TRA: tratamientos, CON (%): contenido de fósforo en porcentaje de materia seca, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

4.4 CONCLUSIONES

El portainjerto Carbonite y 155 tras un incremento en longitud y materia seca de raíz al ser injertados con El Cid F1 confieren la capacidad de mejorar el área foliar y materia seca en la parte aérea, así como una mayor acumulación de materia seca total. El uso de portainjertos con mayor vigor, mejora la tolerancia a salinidad mediante mayor producción de biomasa.

El incremento en la concentración de los cationes Ca^{2+} y Fe^{2+} , es parte de un mecanismo de respuesta para compensar las cantidades excesivas de Na^+ y Cl^- al interior de la planta.

De acuerdo con la relación K/Na, Ca/Na y Mg/Na, el genotipo 155 presenta mayor afinidad en la absorción de K, Ca y Mg por las raíces como mecanismo de tolerancia para enfrentar el estrés salino mediante homeostasis iónica, relacionado a una mayor capacidad en el transporte de agua bajo estas condiciones.

La tolerancia a la sal debe enfocarse en la obtención de genotipos que mantengan las relaciones K/Na, Ca/Na y Mg/Na en valores favorables para las plantas mediante una mayor capacidad de absorción de estos cationes. Un enfoque para mantener la asimilación de K, Ca y Mg, podría ser mediante la selección de portainjertos con mayor vigor radical.

4.5 LITERATURA CITADA

- Abdeldym AE., El-Mogy MM., Hoda RL. Abdellateaf HRL. & Atia MAM. (2020). Genetic characterization, agro-morphological and physiological evaluation of grafted tomato under salinity stress conditions. *Agronomy*, 10, 1948. [10.3390/agronomy10121948](https://doi.org/10.3390/agronomy10121948)
- Abdelgawad KF., El-Mogy MM., Mohamed MIA., Garchery C. & Stevens RG. (2019). Increasing ascorbic acid content and salinity tolerance of cherry tomato plants by suppressed expression of the ascorbate oxidase gene. *Agronomy*, 9, 51. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020051>
- Albacete A., Martínez-Andújar C., Ghanem ME., Acosta M., Sánchez-Bravo J., Asins MJ., Cuartero J., Lutts S., Dodd IC. & Pérez-Alfocea F. (2009). Rootstock-mediated changes in xylem ionic and hormonal status are correlated with delayed leaf senescence, and increased leaf area and crop productivity in salinized tomato. *Plant, Cell Environment*, 32, 928-938.
- Albacete A., Martinez-Andujar C., Martinez-Perez A., Thompson AJ., Dodd IC. & Perez-Alfocea F. (2015). Unravelling rootstock scion interactions to improve food security. *Journal of Experimental Botany*, 66(8), 2211-2226. [10.1093/jxb/erv027](https://doi.org/10.1093/jxb/erv027)
- Al-Harbi A., Hejazi A. & Al-Omran A. (2016). Responses of grafted tomato (*Solanum lycopersicon* L.) to abiotic stresses. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24, 1274-1280. DOI: [10.1016/j.sjbs.2016.01.005](https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.005)
- Al-Karaki GN. (2008). Growth, water use efficiency, and sodium and potassium acquisition by tomato cultivars grown under salt stress. *Journal of Plant Nutrition* 23(1), 1-8. <http://dx.doi.org/10.1080/01904160009381992>
- Aloni B., Karni L., Deventurero G., Levin Z., Cohen R., Katzir N., Lotan-Pompan M., Edelstein M., Aktas H., Turhan E., Joel DM., Horev C. & Kapulnik Y.

- (2008). Possible mechanisms for graft incompatibility between melon scions and pumpkin rootstocks. *Acta Horticulturae*, (782), 313–324.
- Bonarota MS., Kosma DK. & Barrios-Masias FH. (2022). Salt tolerance mechanisms in the *Lycopersicon* clade and their trade-offs. *AoB Plants*, 14, Article plab072. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab072>
- Bristow TS., Hernandez-Espinoza LH., Maria-Sole B. & Barrios-Masias FH. (2021). Tomato rootstocks mediate plant-water Relations and leaf nutrient profiles of a common scion under suboptimal soil temperatures. *Frontiers in Plant Science*, 11. Article 618488. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.618488>
- Cadahia C., (2000). *Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales* (2da Ed.). Ediciones Mundi-prensa.
- Chaichi M.R., Keshavarz-Afshar R., Lu B. & Rostamza M. (2017). Growth and nutrient uptake of tomato in response to application of saline water, biological fertilizer, and surfactant. *Journal of Plant Nutrition* 40, 457–466.
- Cuadrado-García LN., López-Roa EN., Bojacá-Aldana CR. & Almanza-Merchan. (2014). Nitrogen influence in the production of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seeded in substrate in Sutamarchán (Boyacá). *Ciencia y Agricultura*, 11, 85-90.
- Cuartero J., Bolarín MC., Asíns MJ. & Moreno V. (2006). Increasing salt tolerance in the tomato. *Journal of Experimental Botany*, 57, 1045-1058. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj102>
- Di Gioia F., Signore A., Serio F. & Santamaria P. (2013). Grafting improves tomato salinity tolerance through sodium partitioning within the shoot. *HortScience*, 48, 855-862. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.7.855>
- Dodd AN., Kudla J. & Sanders D. (2010). The language of calcium signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 593-620.
- Edelstein M., Cohen R., Baumkoler F. & Ben-Hur M. (2016). Using grafted vegetables to increase tolerance to salt and toxic elements, *Israel Journal of Plant Sciences*, 64(3-4), 3-20. <https://doi.org/10.1080/07929978.2016.1151285>
- Gharsallah C., Fakhfakh H., Grubb D. & Gorsane F. (2016). Effect of salt stress on ion concentration, proline content, antioxidant enzyme activities and gene expression in tomato cultivars. *AoB Plants*, 8, Article plw055. [10.1093/aobpla/plw055](https://doi.org/10.1093/aobpla/plw055).
- Habibi N, Aryan S, Amin MW, Sanada A, Terada N & Koshio K. (2023). Potential benefits of seed priming under salt stress conditions on physiological, and biochemical attributes of micro-tom tomato plants. *Plants (Basel)*, 12(11), Article 2187. doi: 10.3390/plants12112187.
- Hundare A., Joshi V. & Joshi N. (2022). Salicylic acid attenuates salinity-induced growth inhibition in *in vitro* raised ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)

- plantlets by regulating ionic balance and antioxidative system. *Plant Stress* 4, Article 10070. doi: 10.1016/j.stress.2022.100070
- Irshad M., Eneji AE., Khattak RA. & Khan A. (2009). Influence of nitrogen and saline water on the growth and partitioning of mineral content in maize. *Journal of Plant Nutrition*, 32(3), 458-469. doi:10.1080/01904160802660768
- Jackson ML. (1964). *Análisis químico de suelos*. (2da ed). Omega.
- Jiang Z., Zhou X., Tao M., Yuan F., Liu L., Wu F., Wu X., Xiang Y., Niu Y., Liu F., et al. (2019). Plant cell-surface GIPC sphingolipids sense salt to trigger Ca^{2+} influx. *Nature*, 572, 341-346.
- Jones JJB. (1999). *Tomato plant culture, in the field, greenhouse and home garden*. CRC Press.
- Jones BJR., Wolf B. & Mills AH. (1991). *Plant analysis handbook: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide*. Micro-Macro Publishing, Inc.
- Komosa A. & Górniak T. (2015). The Effect of chloride on yield and nutrient interaction in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in rockwool. *Journal of Plant Nutrition*, 38(3), 355-370. doi:10.1080/01904167.2014.934466
- Lee JM., Kubota C., Tsao SJ., Bie Z., Echevarria PH., Morra H. & Ode M. (2010). Current status of vegetable grafting: Diffusion, grafting techniques, automation. *Scientia Horticulturae*, 127, 93-105.
- Mengel K. & Kirkby EA. (2000). *Principios de nutrición vegetal* (Trad. al español de R. J. Melgar y M. Ruíz, 4ª ed. 1987). Internacional Potash Institute.
- Munns R. & Tester M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Mutale-Joan C., Rachidi F., Mohamed HA., Mernissi NE., Aasfar A., Barakate M., Mohammad D., Sbabou L. & El Aroussi HE. (2021). Microalgae-cyanobacteria-based biostimulant effect on salinity tolerance mechanisms, nutrient uptake, and tomato plant growth under salt stress. *Journal of Applied Phycology*, 33, 3779-3795. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02559-0>
- Nedjimi B., & Daoud Y. (2009). Effects of calcium chloride on growth, membrane permeability and root hydraulic conductivity in two atriplex species grown at high (sodium chloride) salinity. *Journal of Plant Nutrition*, 32, 1818-1830.
- Nikolskii-Gavrilov I., Landeros-Sánchez C., Palacios-Velez O. & Hernández-Pérez O. (2015). Impact of climate change on salinity and drainage of irrigated lands in Mexico. *Journal of Agricultural Science*, 7(8), 197-204. doi:10.5539/jas.v7n8p197
- Ntatsi G., Savvas D., Druge U. & Schwarz D. (2013). Contribution of phytohormones in alleviating the impact of sub-optimal temperature stress on grafted tomato. *Science Horticulturae*, 149, 28-38.
- Orosco-Alcalá ABE., Sandoval VM., Trejo-Téllez LI., y Castillo GAM. (2008). *Tolerancia a salinidad en tomate injertado*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.

- Öztekin GB., Leonardi C., Caturano E., Martorana M. & Tüzel Y. (2009). Role of rootstocks on ion uptake of tomato plants grown under saline conditions. *Acta Horticulturae*, 807, 637-642. 10.17660/ActaHortic.2009.807.95
- Pailles Y., Awlia M., Julkowska M., Passone L., Zemmouri K., Negrão S., Schmöckel SM. & Tester M. (2020). Diverse traits contribute to salinity tolerance of wild tomato seedlings from the Galapagos Islands. *Plant Physiology* 182, 534-546.
- Peet MM. (2005). *Irrigation and fertilization*. In E. Huevelink (Ed). *Tomatoes* (pp. 171-198). CABI Publishing.
- Pérez-Grajales M., Pérez-Reyes TQ., Cruz-Álvarez O., Castro-Brindis R. & Martínez-Damián MT. (2021). Compatibilidad del portainjerto CM-334 y su respuesta sobre el rendimiento, calidad fisicoquímica y contenido de capsaicinoides en frutos de *Capsicum pubescens*. *Información Técnica Económica Agraria*, 117, 332-346. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.003>
- Ren J., Ye J., Yin L., Li G., Deng X. & Wang S. (2020). Exogenous melatonin improves salt tolerance by mitigating osmotic, ion, and oxidative stresses in maize seedlings. *Agronomy*, 10(5), 663. doi:10.3390/agronomy10050663
- Rivera P., Moya C. & O'Brien JA. (2022). Low salt treatment results in plant growth enhancement in tomato seedlings. *Plants*, 11, 807. <https://doi.org/10.3390/plants11060807>
- Santa-Cruz A., Martínez-Rodríguez MM., Perez-Alfocea F., Romero-Aranda R. & Bolarin MC. (2002). The rootstock effect on the tomato salinity response depends on the shoot genotype. *Plant Science* 162, 825-831.
- Savvas D., Savva A., Ntatsi G., Ropokis A., Karapanos I., Krumbein A. & Olympios C. (2011). Effects of three commercial rootstocks on mineral nutrition, fruit yield, and quality of salinized tomato. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174, 154-162. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201000099>
- Semíz GD., & Suarez DL. (2015). "Tomato salt tolerance: impact of grafting and water composition on yield and ion relations. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(6). 876-886. <https://doi.org/10.3906/tar-1412-106>
- Shi LX. & Theg SM. 2013. Energetic cost of protein import across the envelope membranes of chloroplasts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 930-935.
- Singh H., Kumar P., Kumar A., Kyriacou MC., Colla G., & Rouphael Y. (2020). Grafting tomato as a tool to improve salt tolerance. *Agronomy*, 10, Article 263. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020263>
- Tester M (2003). Na⁺ tolerance Na⁺ transport in higher plants. *Annals of Botany*, 91, 503-527. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg058>
- Wang Y., Thorup-Kristensen K., Jensen LS., & Magid J. (2016). Vigorous root growth is a better indicator of early nutrient uptake than root hair traits in

- spring wheat grown under low fertility. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 203329. doi: 10.3389/fpls.2016.00865
- Wu H. (2018). Plant salt tolerance and Na⁺ sensing and transport. *The Crop Journal*, 6, 215-225.
- Yang Z., Li G., Tieman D. & Zhu G. (2019). Genomics approaches to domestication studies of horticultural crops. *Horticultural Plant Journal*, 5(6), 240-246. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.11.001>
- Yin L., Wang S., Li J., Tanaka K. & Oka M. (2013). Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of sorghum bicolor. *Acta Physiologiae Planta*, 35(11), 3099-3107. doi: 10.1007/s11738013-1343-5
- Xu X., Magen H., Tarchitzky J., & Kafkafi U. (1999). Advances in chloride nutrition of plants. *Advances in Agronomy*, 68, 97-150. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60844-5
- Zhang W, He X, Chen X, Han H, Shen B, Diao M & Liu H-y (2023). Exogenous selenium promotes the growth of salt stressed tomato seedlings by regulating ionic homeostasis, activation energy allocation and CO₂ assimilation. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1206246. doi: 10.3389/fpls.2023.1206246
- Zhao C., Zhang H., Song C., Zhu JK. & Shabala S. (2020). Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. *The Innovation*, 1(1), Article 100017. 10.1016/j.xinn.2020.100017

5. CARACTERISTICAS DE XILEMA EN INJERTOS DE JITOMATE BAJO ESTRÉS SALINO

RESUMEN

Los portainjertos se caracterizan por conferir cualidades de vigor y tolerancia en plantas de jitomate frente a problemas bióticos y abióticos, como la salinidad; sin embargo, la variación de las características anatómicas de los tallos en la zona cercana al punto de unión del injerto ha sido poco estudiadas a pesar de su influencia sobre la capacidad en el transporte de agua y nutrientes. Se determinaron las modificaciones de área y diámetro Feret, así como la frecuencia de vasos de xilema, en el portainjerto y en el vástago alrededor del punto de unión de 4 autoinjertos de los portainjertos y 4 heteroinjertos de jitomate, con El Cid F1 sobre tres selecciones de líneas como portainjertos y un portainjerto comercial al ser sometidos a dos concentraciones (0 y 70 mM) de NaCl. En los heteroinjertos, el genotipo 155 incrementó el área y diámetro de elementos de vaso del xilema con respecto a zona de portainjerto, relacionado a un incremento en el transporte de agua y nutrientes, aún bajo condiciones de salinidad. De acuerdo con la interacción genotipo x concentración x tipo de injerto; el autoinjerto de '154' presentó mayor frecuencia de vasos, sin embargo, no existe información sobre este cultivo que respalde una mejora tras el incremento de esta variable. El estrés provocado por la salinidad, el corte y rediferenciación en los tallos de plantas de jitomate injertadas, indujeron modificaciones en el tamaño y forma de los vasos de xilema de forma positiva y negativa determinado por la combinación vástago/portainjerto. Por lo que se sugiere que los estudios de las variaciones en los elementos de los vasos de xilema deben ser estudiados de manera específica debido a la variación de las respuestas de las interacciones genotipo*concentración*posición o tipo de injerto.

Palabras clave: absorción nutrimental. área de vaso, cortes anatómicos, *Solanum lycopersicum* L., vasos del xilema.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Juan Ramos Jiménez.

Director de la tesis: Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez

CHARACTERISTICS IN TOMATO GRAFTS UNDER SALINE STRESS

ABSTRACT

Rootstocks are characterized by conferring qualities of vigor and tolerance in tomato plants against biotic and abiotic problems, such as salinity; however, the variation of the anatomical characteristics of the stems in the area near the graft union has been poorly studied despite its influence on the capacity for water and nutrient transport. The modifications of area and Feret diameter, as well as the frequency of xylem vessels, were determined in the rootstock and the scion around the graft union of 4 self-grafts of the rootstocks and 4 tomato heterografts, with El Cid F1 on three selections of lines as rootstocks and one commercial rootstock when subjected to two concentrations (0 and 70 mM) of NaCl. In the heterografts, genotype 155 increased the area and diameter of xylem vessel elements with respect to the rootstock zone, related to an increase in water and nutrient transport, even under saline conditions. According to the genotype x concentration x graft type interaction; the self-graft of '154' presented a higher frequency of vessels, however, there is no information on this crop that supports an improvement after the increase of this variable. The stress caused by salinity, cutting, and redifferentiation in the stems of grafted tomato plants induced modifications in the size and shape of the xylem vessels positively and negatively determined by the scion/rootstock combination. Therefore, it is suggested that studies of variations in xylem vessel elements should be studied specifically due to the variation in responses of genotype x concentration x position or graft type interactions.

Keywords: nutrient absorption, vessel area, anatomical cuts, *Solanum lycopersicum* L., xylem vessels.

Thesis of Master of Sciences in Horticultural, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Juan Ramos Jiménez.

Advisor: Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez.

5.1 INTRODUCCIÓN

El jitomate es de los cultivos más importantes a nivel mundial, por lo que su siembra ocurre frecuentemente en condiciones de salinidad de suelo y/o agua, principalmente en las regiones áridas y semiáridas del mundo (Palacios y Pedraza, 2015). El uso de un portainjertos en diferentes especies de plantas mejora los procesos metabólicos del vástago e incrementan la tolerancia ante condiciones adversas, al favorecer la conductancia hidráulica hacia las hojas (Fan et al., 2015).

Los portainjertos se caracterizan por conferir cualidades de vigor y tolerancia se frente a problemas bióticos y abióticos en plantas (Cookson et al., 2013). Para que el injerto sea exitoso, consta de un proceso bioquímico y estructural complejo que une al portainjerto y el vástago, tras la adhesión de los tejidos y posteriormente su regeneración mediante diferenciación estructural del tejido parenquimatoso de los tubos de xilema y floema, para establecer la continuidad vascular (Aparecido et al., 2017). La variación de las características anatómicas de los tallos en la zona cercana a la unión del injerto, así como su influencia sobre la capacidad en el transporte de agua y nutrientes (Fan et al., 2015; Sory-Toure et al., 2010). Los elementos de los vasos de xilema en el tallo son los principales responsables de conducir agua hacia los brotes; para ello, se necesita una mayor comprensión sobre cómo su estructura se ve afectada en respuesta al estrés salino (Romero-Aranda, Soria & Cuartero, 2001).

En jitomate es muy limitada la información sobre el número de elementos de los vasos xilema en el control del suministro de agua a los brotes, a pesar de que el incremento del diámetro y número de vasos del portainjerto favorece el crecimiento y vigor en especies leñosas (Belda, Felom & Ho, 1996).

En jitomate la susceptibilidad a la pudrición apical del fruto debida a la deficiencia de calcio se incrementa en genotipos con los elementos de los vasos de xilema pequeños, al haber un suministro limitado de agua al fruto (Paul et al., 2017).

Debido a la importancia del injerto en cultivos hortícolas como el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), resulta de importancia cuantificar las variaciones de los vasos de xilema tras el restablecimiento adecuado del sistema vascular en las partes cercanas a la unión del injerto, pues se atribuye a estos caracteres la capacidad de traslocar agua y nutrientes hacia la parte aérea para un desarrollo normal aún en condiciones sub-óptimas de solución nutritiva o del suelo (Albacete et al., 2015).

La presente investigación tuvo como objetivo verificar en cuatro portainjertos de jitomate tolerantes a NaCl las características anatómicas de vasos de xilema (área y frecuencia de vasos) alrededor del punto de unión (portainjerto y vástago) de autoinjertos y heteroinjertos ante estrés salino.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1 Localización

El experimento se realizó en un invernadero de mediana tecnología del Programa de Mejoramiento Genético de Jitomate del Departamento de Fitotecnia, de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), situado en las coordenadas 19°29'35" LN, 98°52'19" LO y 2,267 msnm. Los niveles promedio de temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa del invernadero fueron 21 °C, 65 % y 144.2 $\mu\text{moles de fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente.

5.2.2 Portainjertos y vástagos empleados

Los genotipos evaluados como portainjertos fueron las 3 líneas 103, 154 y 155, todas de crecimiento indeterminado derivadas de *S. habrochaites*; el cultivar comercial Carbonite de la empresa The Rootstock Company; y como injerto, se empleó 'El Cid F1' de HM Clause.

‘El Cid F1’ se sembró el 23 de abril del 2023 en charolas de poliestireno de 200 cavidades rellenas con peat foami y cubiertas con vermiculita. Los portainjertos se sembraron dos días después, con la finalidad de hacer coincidir los diámetros del tallo (1.8 a 2.2 mm) del injerto y el portainjerto.

5.2.3 Diseño de tratamientos

Con los 4 portainjertos y un vástago (El cid F1) se generaron los siguientes tratamientos

- Cuatro autoinjertos de los 4 portainjertos, cortados y vueltos a unir inmediatamente.
- Cuatro heteroinjertos: unión de cuatro portainjertos con un solo vástago (híbrido comercial).

5.2.4 Proceso de injertación

Una vez sincronizados los diámetros de tallo en el punto de corte (25 días después de la siembra), se realizó la injertación tipo empalme, de acuerdo con la metodología empleada por (Pérez-Grajales et al., 2021).

Se seleccionó el vástago y el portainjerto con un diámetro de 1.8 a 2.2 mm.

- 4 Se realizó un corte con un ángulo de aproximadamente 45° en el tallo del portainjerto por debajo de los cotiledones.
- 5 Se colocó la pinza de silicón de 1.8 a 2.2 mm en el tallo del portainjerto, hasta la mitad de su longitud, dejando espacio para colocar el vástago justo arriba.
- 6 El tallo del vástago se cortó en un ángulo de 45° en donde coincidiera con el portainjerto previamente cortado y posteriormente se deslizó en la pinza de silicón hasta empalmarlo con el tallo del portainjerto, procurando que los cortes se mantuvieran paralelos. La pinza de silicón permaneció hasta la formación de callo natural.

- 7 Las plantas injertadas fueron colocadas inmediatamente a una cámara de prendimiento con ambiente de 23 a 28 °C, humedad relativa entre 85 a 95 % y a baja radiación ($125 \mu\text{m}$ de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) durante 7 días.
- 8 Posteriormente, a los cuatro días se realizó la aclimatación de las plantas injertadas, que consiste en ir abriendo la cámara para reducir paulatinamente la humedad relativa y radiación.

Después de los 7 días se llevan al invernadero de plántula para su acondicionamiento, donde se mantiene 7 o 10 días, en caso de usar un solo tallo por planta injertada.

5.2.5 Trasplante

El 02 de junio de 2023 se realizó el trasplante en condiciones de balsas flotantes en invernadero. Los portainjertos, autoinjertos y heteroinjertos se colocaron en las placas de polietileno ubicadas sobre las balsas flotantes de 2.4 m x 1.2 m y 20 cm de altura, cubiertas con plástico blanco de invernadero calibre 600 y capacidad de 500 litros solución nutritiva para plántula propuesta por Cadahia (2000) con algunas modificaciones: 84 ppm de N; 28 ppm de P; 78 ppm de K, 120 ppm de Ca, 24 ppm de Mg, 59 ppm de S, 1 ppm de B, 1.33 ppm de Mn, 0.10 ppm de Cu, 0.07 ppm de Mo, 0.17 ppm de Zn y 5 ppm de Fe. La conductividad eléctrica fue medida con un potenciómetro Hanna (HI98130, USA).

5.2.6 Concentraciones de Cloruro de Sodio

Cinco días después del trasplante (DDT), se aplicó la concentración de 70 mM de NaCl a la solución nutritiva ($4.09 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$); así mismo, se consideró un tratamiento sin aplicación de sales (0 mM de NaCl), la conductividad eléctrica de ambas soluciones nutritivas fueron de $6.9 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y $2.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente.

5.2.7 Obtención de cortes anatómicos

La obtención de muestras se realizó 28 días después del trasplante, se utilizaron tres plantas de cada unidad experimental en las que se obtuvieron tramos de 5 mm de largo en la zona del vástago (I) y en la zona del portainjerto (P).

Los segmentos de tallo se fijaron en una solución GAA: glicerina-alcohol-ácido acético (50 % etanol 96° + 25 % ácido acético glacial + 25 % agua); dichas muestras se sometieron al procesador de tejidos marca Leica Jung (Histokinette 2000) con etilenglicol monoetil éter (Cellosolve) y xileno, para después transferirse a parafina (55 °C) y se sometieron 72 horas dentro de una estufa. El taquete y pirámide de parafina se elaboró de acuerdo con Sass (1968) y con la ayuda de un micrótopo rotatorio marca Leica Jung (Histocut 820). Se realizó la tinción de los cortes con safranina sobre los portaobjetos y verde fijo al 1 %, se cubrieron con cubreobjetos, se empleó como adhesivo bálsamo de Canadá y xileno al 10 % (Sass, 1968).

Los cortes anatómicos fijados en los portaobjetos se analizaron con la técnica de Sperry y Saliendra (1994), que consistió en tomar fotografías de tres repeticiones y cinco campos por repetición cada 90°, con un microscopio óptico marca Olympus BX53, aumentado 4x con objetivo y 10x con ocular, con una cámara digital Motic CAM 580. El cálculo y medición de los caracteres anatómicos se realizó con el programa de distribución libre ImageJ (Rasband, 1997).

5.2.8 Unidad y diseño experimental

La unidad experimental fueron tres plántulas a las cuales se les realizó cortes en la zona del vástago (I), y en la del portainjerto (P), realizados 5 mm sobre y debajo del punto de unión respectivamente, lo que a su vez generó 32 tratamientos.

5.2.9 Caracteres evaluados

En los vasos de xilema, se obtuvo: área de vaso en μm^2 (AV); diámetro Feret de vaso en μm (DF) y frecuencia de vasos por mm^2 (FVA).

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones y 5 submuestreos (campos) en cada unidad experimental. Se realizaron un análisis factorial y comparaciones de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el programa estadístico SAS- V9.0.

5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables área de vaso y diámetro Feret, presentan un comportamiento similar en la interacción Posición x Concentración; es decir, que el estrés salino disminuyó significativamente el desarrollo de vasos de xilema tanto en el vástago, como en el portainjerto. Resultados que difieren con otro estudio donde el desarrollo del xilema en el vástago se comportaban de manera similar, atribuido a que las plantas reducen los tamaños de los vasos como una respuesta ante al estrés ocasionado por la salinidad, para evitar pérdida de agua y turgencia al disminuir su transpiración (Rivas-Ubach et al., 2012).

Cuadro 23. Variación anatómica por la interacción Posición x Concentración de cuatro portainjertos de jitomate, autoinjertos y heteroinjertos con 'El Cid F1', bajo estrés salino.

Posición	Concentración	AV	DF	FV
I	0	5.99a	3.11a	47.19c
I	70	5.65b	3.03b	56.48a
P	0	5.75ab	3.08ab	46.15c
P	70	5.16c	2.91c	52.76b
CV		13.24	6.03	14.53

I: Injerto, P: Portainjerto, AV: área de vaso, DF: Diámetro Feret, FV: Frecuencia de vaso, DMSH= Diferencia Mínima Significativa Honesta. Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

La interacción Genotipo x Concentración indicó que el portainjerto Car disminuyó el desarrollo del xilema en la condición salina; El 103 en presencia de NaCl incrementó la frecuencia de vasos y su tamaño; aunque no se modificó el área total de vasos ($\alpha \leq 0.05$). El 155 no disminuyó el AV total, disminuyó el tamaño de vaso (DF), e incremento la FV ($\alpha \leq 0.05$). El 154 disminuyó AV y DF, pero aumentó la FV ($\alpha \leq 0.05$). Lo que indica que los mecanismos de tolerancia al estrés salino en la planta pueden estar dirigidos a diferentes estrategias.

Los resultados de este estudio podrían explicarse con lo descrito por Kawaguchi et al., (2008), quienes mencionan que reducciones en las modificaciones anatómicas resultan desfavorables para el vástago, debido a que los tejidos en la zona del injerto presentan mucha desorganización en las conexiones y reducción en el área de los vasos de xilema; esto sugiere que se limita la capacidad de transporte de agua y nutrientes (transpiración), y el crecimiento.

Cuadro 24. Variación anatómica mediante la interacción genotipo x concentración en portainjertos de jitomate, autoinjertos y heteroinjertos con 'El Cid F1', bajo estrés salino.

G	CON	AV	DF	FV
Car	0	6.06 ^a	3.04cb	42.86f
Car	70	5.13cd	2.94d	50.73bcd
154	0	5.95 ^a	3.16a	46.61ef
154	70	4.88d	2.81e	60.63a
155	0	6.11 ^a	3.13ab	47.83de
155	70	5.85 ^a	3.0cd	53.8b
103	0	5.35bc	3.04bcd	49.38cde
103	70	5.76ab	3.14ab	53.33bc
CV		13.24	6.03	14.53

G: genotipo, CON: concentración (0 y 70 mM de NaCl), AV: área de vaso, DF: Diámetro Feret, FV: Frecuencia de vaso, CV: Coeficientes de variación, Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

En la interacción Genotipo x Concentración x Posición el área de vaso depende negativamente de la condición salina en la mayoría de los genotipos y posición de corte (P o I), sin embargo, destacan los genotipos 155 y 103 debido a que tienen la capacidad de incrementar en el injerto el área de vaso bajo condiciones de alta salinidad, cabe destacar que el genotipo 103 mantiene el área de vaso en el portainjerto aún bajo el estrés salino. En el diámetro Feret, el genotipo 103 sobresale de los demás genotipos al incrementar esta variable en el injerto, aún bajo condiciones salinas. Mientras que, para la variable frecuencia de vaso, todos los genotipos responden positivamente a la salinidad tanto en el portainjerto como en el injerto, a excepción del genotipo 103, que no presentó diferencias significativas en ambas posiciones de corte al cambiar de solución con 0 mM a solución con 70 mM de NaCl. Sory-Toure et al., (2010) mencionan haber obtenido valores similares de incremento en las variables área y diámetro de vaso en genotipos injertados con respecto a los genotipos sin injertar, lo que sugiere que los cambios en la estructura anatómica del xilema dependerá de la capacidad del genotipo para adaptarse a las condiciones de estrés ocasionado por el corte y la salinidad.

Cuadro 25. Variación anatómica por la interacción del genotipo x posición x concentración de 4 portainjertos de jitomate, autoinjertos y heteroinjertos con 'El Cid F1' bajo condiciones de salinidad.

G	POS	CON	AV	DF	FV
Car	I	0	6.48 ^a	3.11abc	43.63fg
Car	I	70	5.44def	3.0cde	50.73cde
Car	P	0	5.64cde	2.97cde	42.1g
Car	P	70	4.81fg	2.88ef	50.73cde
154	I	0	6.37ab	3.23a	46.9efg
154	I	70	5.16efg	2.88ef	63.9 ^a
154	P	0	5.52cde	3.09a-d	46.33efg
154	P	70	4.59g	2.73f	57.36ab
155	I	0	5.75b-e	3.08a-d	49.4def
155	I	70	6.15abc	3.06bcd	56.4bc
155	P	0	6.48a	3.18ab	46.26efg
155	P	70	5.54cde	2.94de	51.2bcd
103	I	0	5.36def	3.01cde	50.36cde
103	I	70	5.84a-d	3.18ab	54.9bcd
103	P	0	5.34def	3.07bcd	48.4d-g
103	P	70	5.68cde	3.10abc	51.76b-e
CV			13.24	6.03	14.53

I: Injerto, P: Portainjerto, G: genotipo, CON: concentración (0 y 70 mM de NaCl), POS: posición de corte, AV: área de vaso, DF: Diámetro Feret, FV: Frecuencia de vaso, CV: coeficiente de variación, Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

En la interacción Genotipo x Concentración x Tipo de injerto, la variable área de vaso y diámetro Feret dependen negativamente de la salinidad, cabe destacar que el portainjerto 155 cuando es injertado con 'El Cid F1' tiene la capacidad de incrementar el área de vaso bajo condiciones de salinidad. Para la variable diámetro Feret, los genotipos que no muestran una dependencia con respecto a la salinidad, al no mostrar diferencias significativas, son el genotipo Carbonite y

155 como heteroinjerto y el genotipo 103 como autoinjerto y heteroinjerto. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Paul et al. (2017), donde la producción de biomasa resultó afectada favorecida en aquellos genotipos de papa (*S. tuberosum*) que tienen la capacidad de incrementar o mantener el área y diámetro de los elementos de los vasos del xilema en condiciones de estrés ocasionado por altas temperaturas. Esto podría explicarse por la capacidad de transporte de agua y nutrientes hacia las hojas, lo que sugiere una reducción de la traslocación de fotoasimilados hacia los tubérculos (Scoffoni et al., 2017). En contraste, la variable frecuencia de vaso, depende positivamente de la condición salina, el menor y mayor valor se encontró en el genotipo 154 autoinjertado con 39.33 en la solución con 0 mM y 61.9 en la solución con 70 mM de NaCl.

Cuadro 26. Variación anatómica por la Interacción del genotipo x posición x concentración de 4 portainjertos de jitomate, autoinjertos y heteroinjertos con 'El Cid F1' bajo condiciones de salinidad.

G	CON	TIP	AV	DF	FV
Car	0	A	6.16abc	2.99bcd	42.1gh
Car	70	A	4.94fg	2.82ef	50.36ef
Car	0	H	5.96bcd	3.10ab	43.63gh
Car	70	H	5.31def	3.06abc	51.1def
154	0	A	6.09abc	3.16a	39.33h
154	70	A	5.16efg	2.88def	61.9a
154	0	H	5.80b-e	3.16a	53.9b-f
154	70	H	4.59g	2.73f	59.36ab
155	0	A	5.71cde	3.13ab	42.9gh
155	70	A	5.32def	2.90cde	56.36ae
155	0	H	6.12b	3.13ab	52.76c-f
155	70	H	6.52 ^a	3.19a	51.23def
103	0	A	5.28ef	3.10ab	41.73h
103	70	A	5.71cde	3.09ab	48.36fg

103	0	H	5.43def	2.98be	57.03a-d
103	70	H	5.81be	3.10a-b	58.3abc
CV			13.24	6.03	14.53

I: Injerto, P: Portainjerto, G: genotipo, CON: concentración (0 y 70 mM de NaCl), TIP: tipo de injerto, AV: área de vaso, DF: Diámetro Feret, FV: Frecuencia de vaso, CV: coeficiente de variación, Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

5.4 CONCLUSIONES

El genotipo 155 tiene la capacidad de incrementar el área de los vasos del xilema en 'El Cid F1' ante el estrés ocasionado por la salinidad, por lo que sugiere un mayor transporte de agua y nutrientes bajo estas condiciones.

El estrés provocado por la salinidad, el corte y rediferenciación en los tallos de plantas de jitomate injertadas, indujeron modificaciones en el tamaño y forma de los vasos de xilema tanto de manera favorable como desfavorable, determinado por la combinación específica del vástago/portainjerto.

Un resultado general es que, ante la presencia de estrés salino, la frecuencia de vasos incrementa, tanto en el portainjerto como en el vástago. El tamaño de vasos (DF) y el área total de vasos depende de la combinación de genotipos involucrados al practicar el injerto.

Las variaciones en los elementos de los vasos de xilema deben ser estudiados de manera específica debido a la variación de las respuestas de las interacciones genotipo x concentración x posición o tipo de injerto.

5.5 LITERATURA CITADA

- Albacete A., Martinez-Andujar C., Martinez-Perez A., Thompson AJ., Dodd IC. & Perez-Alfocea F. (2015). Unravelling rootstock scion interactions to improve food security. *Journal of Experimental Botany*, 66(8), 2211-2226. 10.1093/jxb/erv027
- Aparecido L., Trevisan L. & Falleiros R. (2017). Grafting in vegetable crops: a great technique for agriculture. *International Journal of Vegetable Science*, 24(5), 1-18. DOI:10.1080/19315260.2017.1357062
- Belda RM.; Fenlon JS.; Ho LC. (1996). Salinity effects on the xylem vessels in tomato fruit among cultivars with different susceptibilities to blossom-end rot. *Journal Horticultural Science*, 71, 173–179.
- Cadahia C., (2000). *Fertirrigación, cultivos hortícolas y ornamentales* (2da. Ed.). Ediciones Mundi-prensa.
- Cookson SJ., Moreno MJC., Hevin C., Mendome LZN., Delrot S., Trossat-Magnin C., & Ollat N. (2013). Graft union formation in grapevine induces transcriptional changes related to cell wall modification, wounding, hormone signaling, and secondary metabolism. *Journal of Experimental Botany*, 64, 2997-3008.
- Fan J., Yang R., Li X., Zhao W., Zhao F., & Wang S. The processes of graft union formation in tomato. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 56, 569–574. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-0009-1>
- Kawaguchi MA. Taji A., Backhouse D. & Oda M. (2008). Anatomy and physiology of graft incompatibility in solanaceous plants, *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 83(5), 581-588. <http://dx.doi.org/10.1080/14620316.2008.11512427>
- Palacios VO. & Pedraza O. (2015). “Drainage and salinity problems in the Mexican irrigation districts: an overview 1962-2013”. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6, 113-123.
- Paul S., Das MK., Baishya P., Ramteke A., Farooq M., Baroowa B., Sunkar R. & Gogoi N. (2017). Effect of high temperature on yield associated parameters and vascular bundle development in five potato cultivars. *Scientia Horticulturae*, 225, 134-140.
- Pérez-Grajales M., Pérez-Reyes TQ., Cruz-Álvarez O., Castro-Brindis R. & Martínez-Damián MT. (2021). Compatibilidad del portainjerto CM-334 y su respuesta sobre el rendimiento, calidad fisicoquímica y contenido de capsaicinoides en frutos de *Capsicum pubescens*. *Información Técnica Económica Agraria*, 117, 332-346. <https://doi.org/10.12706/itea.2021.003>
- Rasband, WS. (1997). *ImageJ: Image processing and analysis in Java*. U.S. National Institutes of Health.

- Rivas-Ubach A., Sardans J., Pérez-Trujillo M., Estiarte M. & Peñuelas J. (2012). Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 4181-4186.
- Romero-Aranda R., Soria T. & Cuartero J. (2001). Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Science*. 160(2), 265-272. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00388-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00388-5)
- Sass, JE. (1968). *Botanical microtechnique*. The Iowa State University Press. Ames.
- Scoffoni C, Albuquerque C, Brodersen CR, Townes SV, John GP, Cochard H, Buckley TN, McElrone AJ & Sack L. (2017). Leaf vein xylem conduit diameter influences susceptibility to embolism and hydraulic decline. *New Phytol*, 213(3), 1076-1092
- Sory-Toure A., Nieto-Ángel R., Rodríguez-Pérez JE., Barrientos-Priego AF., Ibáñez-Castillo LA., Romanchik K. y Núñez-Colín CA. (2010). Variación anatómica del xilema en tallo de cultivares de tomate injertados en un tipo criollo. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 16(1), 67-76.

CONCLUSIÓN GENERAL

El genotipo 155 es un portainjerto potencial con tolerancia a salinidad por cloruro de sodio al poseer un sistema radical vigoroso, por su capacidad de incrementar el área y diámetro de los vasos del xilema en el injerto, lo que se asoció a una mayor capacidad en el transporte de agua y nutrientes hacia el vástago, mejoró K/Na, Ca /Na y Mg/Na en hojas y tallos, lo que a su vez resultó en el incremento del área foliar y materia seca aérea en el injerto. Adicionalmente, ante el estrés salino logró mantener el área total de vasos al incrementar la frecuencia de estos; a pesar de que se disminuyó el tamaño individual del vaso de xilema.

Ante el incremento de áreas agrícolas con problemas de salinidad en el suelo o en aguas de riego, la selección de portainjertos tolerantes a esta condición y a otros factores bióticos, es de gran importancia para evitar disminuciones drásticas de la productividad de los cultivos, reducir costos de producción y contribuir a la sostenibilidad ambiental al evitar gastos innecesarios de productos o técnicas que requieren de más agua dulce para desalinizar los suelos.