

Artículo científico

Respuesta a distintas concentraciones de cloruro de potasio en plantas de tomate bajo estrés salino

Response to different concentrations of potassium chloride in tomato plants under salt stress

Homero Ramírez¹, Victor Saul Aguilar Zuluaga^{2*}, Alejandro Zermeño González³, Armando Hernández Pérez¹ y Carlos Rodríguez Cisneros⁴

- 1 Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP 25315. Saltillo, Coahuila, México; hrr_homero@hotmail.com (H.R.), hernandez865@hotmail.com (A.H.P.)
- 2 Maestría en Ciencias en Ingeniería en Sistemas de Producción Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP 25315. Saltillo, Coahuila, México.
- 3 Departamento de Riego y Drenaje. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP 25315. Saltillo, Coahuila, México; azermenog@hotmail.com (A.Z.G.)
- 4 United Phosphorous Limited. Industria siderúrgica 2036, CP 30903. Ramos Arizpe, Coahuila, México.; carlosrodriguez.cisneros@upl-ltd.com (C.R.C.)

* Autor para correspondencia: aguilarzuluagavs@gmail.com

Recibido:

26/09/2025

Aceptado:

13/03/2026

Publicado:

16/04/2026

Como citar:

Ramírez H., Aguilar Zuluaga V.S., Zermeño González A., Hernández Pérez A., Rodríguez Cisneros C. (2026). Respuesta a distintas concentraciones de cloruro de potasio en plantas de tomate bajo estrés salino. *Universitas Agri* 5(1): e56. <https://doi.org/10.59741/agri.v5i1.56>

RESUMEN

La salinidad en la horticultura mundial es un problema severo que afecta la productividad y calidad de las cosechas. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de KCl en soluciones nutritivas preparadas con agua purificada y agua dura en plantas de tomate. Se utilizaron soluciones de Steiner con adiciones de 3, 6 y 9 mmol de KCl, tanto en agua purificada como en agua dura. Se midieron concentraciones de calcio, potasio y sodio en pecíolo, incidencia de pudrición apical del fruto (BER), contenido de nitrato, clorofila total (SPAD), actividad antioxidante (IC₅₀), conductancia estomática y peso seco de raíz. Los resultados indicaron que en agua dura con 3mmol de KCl mostro un menor valor (0.28) de IC₅₀ lo que sugiere una mayor actividad antioxidante y menor estrés oxidativo con respecto a Steiner (0.32) en agua dura. La acumulación de sodio fue más pronunciada en los tratamientos con agua dura hasta un 32.87 % con 6 mmol de KCl, aunque sin comprometer severamente la fisiología vegetal, posiblemente por mecanismos de compartimentación o exclusión iónica. Se observó una relación inversa entre el contenido de calcio en pecíolo y la incidencia de BER, especialmente en tratamientos con mayores concentraciones de KCl, sugiriendo un antagonismo entre K⁺ y Ca²⁺. Mientras que 9 mmol de KCl en agua purificada presento un promedio de 3.29 frutos dañados por planta y 135.27 mg/L de calcio, 3 mmol de KCl en agua dura mostro un promedio de 0.75 frutos dañados por planta y 340 mg/L de calcio. La clorofila total fue mayor en plantas tratadas con soluciones preparadas en agua dura, hasta en 5.96 % reflejando una mejor eficiencia fotosintética bajo condiciones de dureza y óptimo suministro de K⁺.

Palabras clave: Salinidad; KCl; tolerancia; crecimiento.



ABSTRACT

Salinity in global horticulture is a severe problem that affects crop productivity and quality. The aim of this study was to evaluate the effect of different concentrations of KCl in nutrient solutions prepared with purified water and hard water on tomato plants. Steiner solutions with additions of 3, 6, and 9 mmol of KCl were used, both in purified and hard water. Calcium, potassium, and sodium concentrations in the petiole were measured, as well as the incidence of blossom-end rot (BER), nitrate content, total chlorophyll (SPAD), antioxidant activity (IC_{50}), stomatal conductance, and root dry weight. The results indicated that in hard water with 3 mmol of KCl, a lower IC_{50} value (0.28) was observed, suggesting higher antioxidant activity and lower oxidative stress compared to Steiner (0.32) in hard water. Sodium accumulation was more pronounced in treatments with hard water, up to 32.87 % with 6 mmol of KCl, although without severely compromising plant physiology, possibly due to mechanisms of compartmentalization or ion exclusion. An inverse relationship was observed between calcium content in the petiole and the incidence of BER, especially in treatments with higher concentrations of KCl, suggesting an antagonism between K^+ and Ca^{2+} . While 9 mmol of KCl in purified water presented an average of 3.29 damaged fruits per plant and 135.27 mg/L of calcium, 3 mmol of KCl in hard water showed an average of 0.75 damaged fruits per plant and 340 mg/L of calcium. Total chlorophyll was higher in plants treated with solutions prepared in hard water, by up to 5.96 %, reflecting better photosynthetic efficiency under hardness conditions and optimal K supply.

Keywords: Salinity; KCl; tolerance; growth.

1. INTRODUCCIÓN

Entre los diferentes tipos de estreses abióticos que afectan la productividad agrícola, la salinidad del suelo representa una de las amenazas más serias para los cultivos, incluyendo al tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Enríquez-Acosta et al., 2025). Se estima que aproximadamente el 50 % de las pérdidas agrícolas a nivel mundial están relacionadas con el estrés salino, lo cual representa un riesgo significativo para la seguridad alimentaria global (Urias-Salazar et al., 2022). La agricultura moderna prioriza dos problemas críticos, la disminución de tierra arable debido a la escasez de agua y el aumento progresivo de los suelos salinos, principalmente zonas áridas y semiáridas. El tomate tiene una producción de 100 millones de toneladas anuales, las cuales se están viendo afectadas por dichos problemas (Cialli et al., 2025). El aumento de la temperatura global, el cambio constante de los patrones de precipitación y la aceleración en los procesos de evapotranspiración que contribuye a que más sales solubles queden en la rizosfera, hace que se agrave el estrés salino (Gupta et al., 2025).

La mayoría de las especies cultivadas son glucófitas, es decir, sensibles a la salinidad, y presentan una alta vulnerabilidad frente al exceso de iones como sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-) en el suelo. Este tipo de estrés puede inducirse a través de mecanismos osmóticos, iónicos y secundarios, afectando múltiples procesos fisiológicos de las plantas (Yang and Guo, 2018). El tomate es considerado una especie medianamente tolerante a salinidad y el rendimiento se ve afectado cuando la conductividad eléctrica del suelo o del agua de irrigación supera los 2.5 dS m^{-1} (Adarsh et al., 2025).

Frente a esta problemática, la nutrición mineral ha cobrado importancia como estrategia para mitigar los efectos del estrés salino. En particular, el cloruro de potasio (KCl) destaca como una fuente potásica eficaz por su alta solubilidad, bajo costo y contenido significativo de potasio, especialmente en países como México (Ruiz-Ramirez et al., 2021). El potasio desempeña funciones esenciales en la planta, tales como la regulación osmótica, la activación enzimática y el balance iónico. Su aplicación adecuada contribuye a contrarrestar los efectos negativos del exceso de sodio en los cultivos. México posee una gran cantidad de tierras áridas y semi áridas ubicadas al norte del país principalmente las cuales se ven afectadas por salinidad donde cationes Na^+ compiten con el Ca^{2+} desplazándolo del complejo arcillo-húmico aumentando así, el potencial osmótico del suelo (Enríquez-Acosta et al., 2023). A pesar de los avances científicos en fertirriego, aún existe



desinformación respecto a la interacción entre el manejo del riego y los distintos niveles nutricionales, dicho balance es importante en cultivos de alta demanda como el tomate, una de las hortalizas más producidas y consumidas a nivel global (Soto-Bravo, 2025).

Algunas fuentes potásicas, como el nitrato de potasio, han demostrado ser efectivas en la mitigación del estrés causado por el cloruro de sodio, al reducir la acumulación excesiva de sodio y cloruros en los tejidos vegetales (Ronen and Chemicals, 2010). Asimismo, las plantas sometidas a estrés hídrico o salino pueden activar mecanismos de defensa como la síntesis de solutos orgánicos e inorgánicos, lo cual favorece el mantenimiento del equilibrio osmótico, incrementa la actividad antioxidante y mejora la tolerancia general al estrés ambiental.

México ocupa el décimo lugar a nivel mundial en la producción de tomate, siendo esta hortaliza una de las principales exportaciones agrícolas del país (Ignacio Orona Castillo et al., 2022). El tomate tiene una alta relevancia nutricional, debido a su contenido de minerales como potasio, fósforo, calcio y sodio, además de vitaminas A, B1 y C, así como compuestos antioxidantes beneficiosos para la salud (Leyva-Morales et al., 2025). El efecto macroscópico salino en el tomate se traduce a una reducción del crecimiento vegetativo y disminución de cosecha, con variaciones dependiendo de cada genotipo. Aunado a esto, la absorción de N también se ve afectada (Zuchi et al., 2010). La salinidad también influye en una sobreproducción de ROS generando peroxidación lipídica en la membrana (Liu et al., 2024).

El uso de KCl permitirá evaluar el efecto específico del K sobre la respuesta fisiológica del tomate bajo condiciones de salinidad, evitando que nutrimentos adicionales como el nitrógeno (KNO_3) y el sulfato (K_2SO_4) interfieran en variables como la fotosíntesis y sistemas antioxidantes. Se ha demostrado que el suministro adecuado de K^+ puede mitigar efectos por la salinidad al generar selectividad iónica. Sin embargo, la respuesta de las plantas no depende exclusivamente de la cantidad de K^+ también influye la fuente utilizada, debido a que los iones acompañantes pueden ejercer efectos fisiológicos independientes que pueden hacer confusa la interpretación de los resultados.

En este contexto, y considerando el impacto de la salinidad en cultivos de alto valor como el tomate, resulta de gran interés explorar alternativas agronómicas que permitan mejorar su tolerancia al estrés salino. Este estudio se realizó bajo el supuesto de que el KCl puede mitigar efectos por salinidad en tomate. Por ello, el objetivo es evaluar los efectos de distintas concentraciones de cloruro de potasio en plantas de tomate sometidas a condiciones salinas, para determinar su potencial como estrategia de manejo nutricional frente al estrés por salinidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 *Sitio Experimental*

El experimento fue establecido en octubre de 2024 en las instalaciones de la empresa UPL Open AG Ramos Arizpe, ubicada en Ramos Arizpe, Coahuila, México (25° 33' 31.2" N, 100° 55' 27.7" W). El estudio se llevó a cabo en un invernadero de alta tecnología que permitió controlar las condiciones ambientales necesarias para el desarrollo del cultivo.

2.2 *Material Vegetal y Condiciones de Siembra*

Se utilizó semilla de tomate determinado tipo Saladette, variedad SV3543TE de la empresa Seminis. La siembra se realizó en el estadio principal 0 (000 en la escala BBCH), en dos charolas plásticas negras de 77 cavidades cada una, utilizando sustrato comercial BM 2 EURO Berger.

El trasplante se efectuó a los 23 días después de la siembra (DDS), en el estadio 1 (102 BBCH), en macetas plásticas negras de 11.36 L de capacidad. El sustrato consistió en una mezcla de peat moss (BM 2 EURO Berger), perlita (Termolita HORTIPERL) y vermiculita (VERMILITA VERLITE) en una proporción 3:2:1. Las macetas fueron dispuestas sobre mesas de 1 m de ancho por 3 m de largo y 1 m de altura, con tres plantas por metro lineal, alcanzando un total de 120 plantas.



2.3 Tratamientos y Diseño Experimental

El tratamiento nutricional se inició a los 11 días después del trasplante (103 BBCH), empleando soluciones basadas en la fórmula universal de Steiner. Se aplicaron tres concentraciones de cloruro de potasio (KCl): 3, 6 y 9 mmol, disueltas en dos tipos de agua: purificada y dura (urbana) sin neutralizar, generando así seis tratamientos experimentales más dos testigos (uno por tipo de agua sin KCl).

| | | |
|----|------------|------------|
| T1 | Steiner | |
| T2 | 3 mmol KCl | Agua |
| T3 | 6 mmol KCl | purificada |
| T4 | 9 mmol KCl | |
| T5 | Steiner | |
| T6 | 3 mmol KCl | Agua dura |
| T7 | 6 mmol KCl | |
| T8 | 9 mmol KCl | |

El diseño experimental consistió en bloques completos al azar con un arreglo factorial 3×2 , donde: Factor A: Concentración de cloruro de potasio (3, 6, 9 mmol), Factor B: Tipo de agua (purificada o dura). Se tuvieron 16 repeticiones por tratamiento en 8 bloques, correspondiendo a dos repeticiones por tratamiento por bloque.

Durante la fase vegetativa, cada maceta recibió 0.5 L de solución diaria, evitando lixiviación para promover la acumulación de sales en la rizosfera. A partir del estadio reproductivo (503 BBCH), se ajustó la solución y se aumentó el riego a 1 L por maceta por día. Para cada una de las 8 soluciones que se prepararon la CE fue contralada en todo momento.

2.4 Variables Fisiológicas y Bioquímicas

2.4.1 Conductancia estomática

Se midió con un porómetro (LI-COR, LI-600N, Estados Unidos) bajo condiciones ambientales controladas (humedad relativa, radiación y temperatura). Las lecturas se tomaron en un foliolo de la tercera hoja desarrollada más joven (603 BBCH), en un total de 64 plantas seleccionadas aleatoriamente.

2.4.2 Contenido de clorofila

Se utilizó un medidor de clorofila (Falker, clorofiLOG CGL2060, Brasil). Por cada planta ($n = 120$), se realizaron tres mediciones en foliolos distintos de la tercera hoja desarrollada más joven (603 BBCH), y se calculó un promedio por planta.

2.4.3 Composición iónica del extracto celular de peciolo (ECP)

Se realizó para determinar los niveles de nitrato (NO_3^-), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y sodio (Na^+). Se utilizó el kit de muestreo nutricional (Horiba, Laquatwin, Japón). Se cortó la tercera hoja madura más joven (604 BBCH), se eliminaron los foliolos y se extrajo el jugo del peciolo utilizando un macerador de ajo (DOSNTO, YostyleAusein, China). El extracto se analizó con medidores individuales y se utilizaron jeringas limpias para evitar contaminación entre muestras.

2.4.4 Frutos afectados por pudrición apical de fruto (BER)

Se realizó un conteo manual de frutos con daño por pudrición apical (BER) a los 93 días después del trasplante (605 BBCH).

2.4.5 Actividad antioxidante

Se evaluó en la tercera hoja madura más joven (605 BBCH) utilizando la técnica del radical DPPH descrita por (Brand-Williams et al., 1995) mediante espectrofotometría. Las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro (Bio-Tek Instruments, ELx800, Estados Unidos).

2.4.6 Peso seco de raíz



Se determinó a los 138 días después del trasplante, luego de la cosecha y secado de raíces el cual fue durante tres días a 60 °C en un horno de secado.

2.4.7 Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis estadístico mediante el software SAS, utilizando prueba de comparación de medias de Duncan con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, para evaluar las diferencias significativas entre tratamientos.

3. RESULTADOS

3.1 Parámetros bioquímicos

3.1.1 Actividad antioxidante

Se observaron diferencias significativas en la actividad antioxidante ($\alpha = 0.05$) entre tratamientos, especialmente en los aplicados en agua purificada. La concentración de 9 mmol de KCl presentó los valores más altos de actividad antioxidante y menor IC_{50} . Se observó una tendencia descendente en la actividad antioxidante proporcional al aumento de concentración de KCl, lo que podría indicar una respuesta fisiológica al estrés osmótico inducido por la mayor carga salina.

Los resultados indicaron que en agua dura con 3mmol de KCl mostro un menor valor (0.28) de IC_{50} lo que sugiere una mayor actividad antioxidante y menor estrés oxidativo con respecto a Steiner (0.32) en agua dura a pesar de no mostrar diferencias significativas

Ninguno de los tratamientos con KCl en agua dura presentó disminuciones significativas con respecto a los testigos (Figura 1). Esto sugiere que el tipo de agua y el incremento en la salinidad influyen directamente en la activación del sistema antioxidante como mecanismo de defensa en las plantas de tomate.

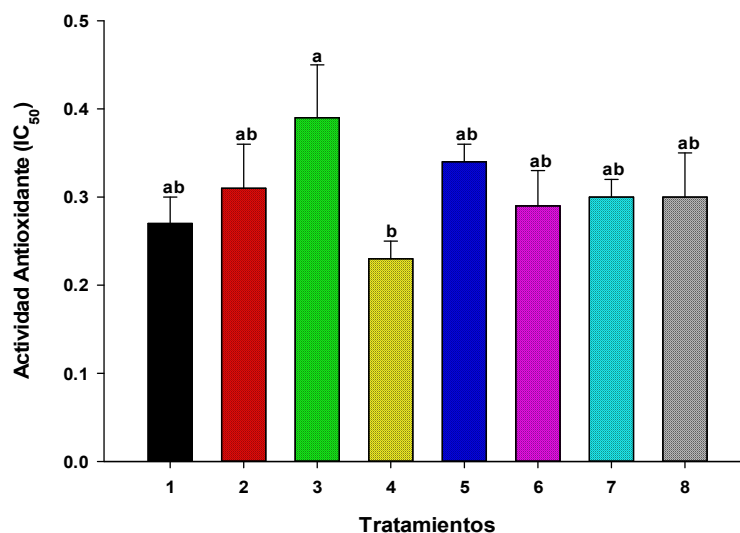


Figura 1. Actividad antioxidante en hojas de tomate sometido a estrés salino con diferentes concentraciones de cloruro de potasio (KCl) en agua purificada (AP) y dura (AD). Tratamiento (T)1.- Steiner en AP; T2.- 3 mmol de KCl en AP; T3.- 6 mmol de KCl en AP; T4.- 9 mmol de KCl en AP; T5.- Steiner en AD; T6.- 3 mmol de KCl en AD; T7.- 6 mmol de KCl en AD; T8.- 9 mmol de KCl en AD. Misma letra en columnas es estadísticamente igual según la prueba de comparación Duncan de rango múltiple ($\alpha = 0.05$).

3.2 Parámetros fisiológicos



3.2.1 Conductancia estomática

Los valores de conductancia estomática mostraron diferencias entre tratamientos. El tratamiento con 6 mmol de KCl en agua purificada presentó los niveles más bajos de conductancia estomática, estadísticamente inferior al tratamiento testigo con Steiner en agua purificada ($\alpha = 0.05$), lo que indica una posible respuesta al estrés osmótico. Por otro lado, Steiner en agua dura mostró valores estadísticamente similares a todos los tratamientos restantes (en ambos tipos de agua), lo que sugiere que la variación en la apertura estomática no fue significativa bajo condiciones de agua dura (Figura 2A). Esta reducción en la apertura estomática en el tratamiento con 6 mmol podría relacionarse con una estrategia de conservación hídrica de la planta ante condiciones salinas inducidas por la fertilización con KCl.

3.3 Clorofila total

El contenido de clorofila, evaluado mediante mediciones indirectas por foliolo, mostró una reducción significativa ($\alpha = 0.05$) en las tres concentraciones de KCl aplicadas en agua purificada, en comparación con el tratamiento testigo (Steiner en ambos tipos de agua). En contraste, los tratamientos con KCl en agua dura no presentaron diferencias significativas con respecto a los testigos, indicando un efecto estabilizador del KCl en la producción de clorofila bajo estrés salino.

Este patrón sugiere que la interacción entre la concentración de KCl y la calidad del agua podría alterar la eficiencia fotosintética, particularmente en medios con baja dureza iónica (Figura 2B).

3.4 Contenido de nitrato en peciolo

El análisis de nitrato en peciolo reveló diferencias significativas entre tratamientos. Las concentraciones de 3 y 6 mmol de KCl en agua purificada presentaron los valores más altos de nitrato, estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05$) al tratamiento testigo con solución Steiner en agua purificada. En contraste, la aplicación de 9 mmol de KCl en agua purificada provocó una disminución del contenido de nitrato, siendo inferior al testigo y estadísticamente similar a los valores observados en todos los tratamientos con agua dura.

En general, los tratamientos con KCl en agua dura no mostraron diferencias significativas entre sí ($\alpha = 0.05$), no obstante, la concentración de 3 mmol de KCl en agua dura mostró una tendencia al incremento del nitrato en peciolo (Figura 2C).

3.5 Contenido de potasio en peciolo

En cuanto al contenido de potasio, se observó un patrón inverso. La mayor concentración se encontró en los tratamientos con 9 mmol de KCl en ambos tipos de agua, mientras que los tratamientos testigo (Steiner en agua purificada y dura) mostraron las concentraciones más bajas. De igual manera, en ambos tipos de agua el contenido de potasio aumentó progresivamente con el incremento de la concentración de KCl, confirmando la efectividad de las soluciones aplicadas en aportar este ion a las plantas (Figura 2D).

3.6 Contenido de calcio en peciolo

El contenido de calcio en peciolo fue mayor en los tratamientos con 3 y 6 mmol de KCl en agua dura, en comparación con el testigo (solución Steiner). Sin embargo, el tratamiento con 9 mmol en agua dura no mostró diferencias significativas con respecto al testigo, indicando una posible saturación o antagonismo iónico a concentraciones elevadas.

En tratamientos con agua purificada, los niveles de calcio en 3 y 6 mmol de KCl se mantuvieron similares a los del testigo, mientras que el tratamiento con 9 mmol en agua purificada presentó una disminución significativa, registrando los valores más bajos entre todos los tratamientos (Figura 2E). Este resultado sugiere que concentraciones altas de KCl en agua con baja mineralización pueden interferir negativamente con la absorción de calcio.

3.7 Contenido de sodio en peciolo

El contenido de sodio (Na^+) en los peciolo presentó sus valores más altos en los tratamientos con 3 y 6 mmol de KCl en agua dura, siendo significativamente superiores ($\alpha = 0.05$) a los observados en los tratamientos testigo (Steiner en agua purificada y agua dura). Esto sugiere que el uso de agua dura en combinación con KCl favorece la acumulación de sodio



en el tejido vegetal, probablemente debido a la composición iónica del agua y a la menor movilidad del sodio en sustratos con menor lixiviación.

En los tratamientos con agua purificada, se observó una tendencia ascendente en los niveles de sodio conforme aumentó la concentración de KCl, aunque sin diferencias estadísticas significativas con respecto al tratamiento testigo (Figura 2F). Este comportamiento sugiere un efecto acumulativo moderado de Na^+ bajo condiciones de agua de baja salinidad residual.

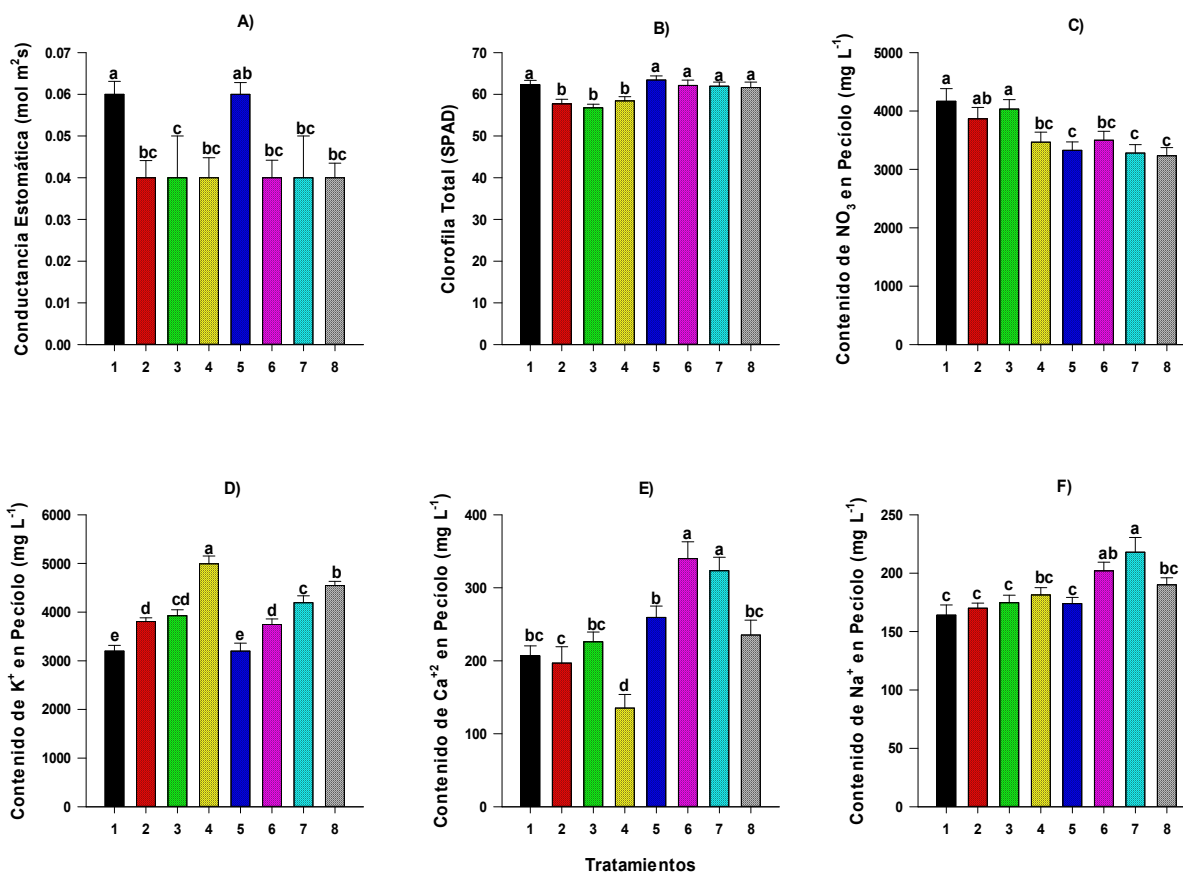


Figura 2. Parámetros fisiológicos en planta de tomate sometido a estrés salino con diferentes concentraciones de cloruro de potasio (KCl) en agua purificada (AP) y dura (AD). Tratamiento (T)1.- Steiner en AP; T2.- 3 mmol de KCl en AP; T3.- 6 mmol de KCl en AP; T4.- 9 mmol de KCl en AP; T5.- Steiner en AD; T6.- 3 mmol de KCl en AD; T7.- 6 mmol de KCl en AD; T8.- 9 mmol de KCl en AD. Misma letra en columnas es estadísticamente igual según la prueba de comparación Duncan de rango múltiple ($\alpha = 0.05$). A) Conductancia estomática; B) Clorofila total; C) Contenido de nitrato en peciolo; D) Contenido de potasio en peciolo; E) Contenido de calcio en peciolo; F) Contenido de sodio en peciolo.

3.8 Parámetros morfológicos

3.8.1 Peso seco de raíz

El análisis del peso seco de raíz reveló un aumento progresivo en tratamientos con KCl en agua purificada a medida que se incrementó la concentración de KCl, lo que podría reflejar una respuesta adaptativa del sistema radicular frente al estrés inducido por salinidad leve. Aunque no se observaron diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0.05$) entre tratamientos, la tendencia indica una estimulación del desarrollo radicular en condiciones moderadas de salinidad.

Para los tratamientos en agua dura, se observó un comportamiento similar hasta la concentración de 6 mmol. Sin embargo, en el tratamiento con 9 mmol de KCl en agua dura, el peso seco de raíz mostró una ligera reducción, aunque esta tampoco fue estadísticamente diferente del testigo (Figura 3A). Esto sugiere un posible umbral de tolerancia a la acumulación salina en el sistema radicular, donde concentraciones elevadas comienzan a afectar el crecimiento.

3.9 Blossom End Rot (*Pudrición apical del fruto*)

El número de frutos con daño por pudrición apical (BER) fue significativamente mayor en el tratamiento con 9 mmol de KCl en agua purificada, así como en agua dura con 6 y 9 mmol, sin que hubiera diferencias significativas entre estos tres tratamientos. En contraste, los valores más bajos de frutos dañados se registraron en los tratamientos testigo Steiner en agua purificada (0.22) y dura (0.63), así como en los tratamientos con 3 mmol de KCl en ambos tipos de agua (Figura 3B).

Estos resultados sugieren una posible relación entre el exceso de potasio y la disminución en la absorción de calcio, lo cual estaría favoreciendo la aparición de BER, condición fisiológica estrechamente asociada a deficiencias de calcio en frutos en desarrollo.

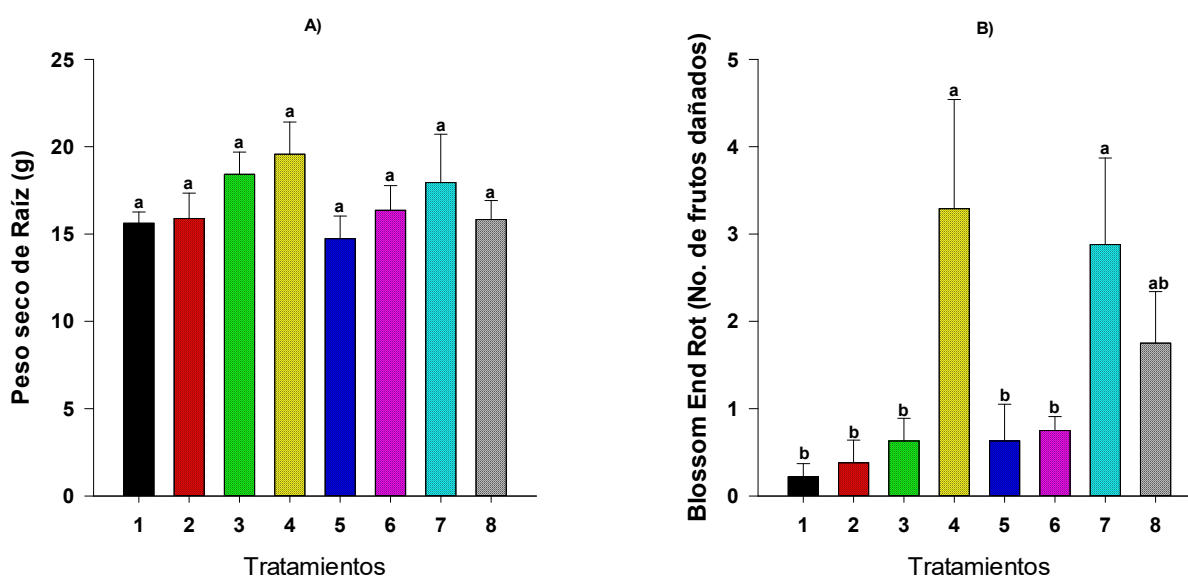


Figura 3. Parámetros morfológicos en planta de tomate sometido a estrés salino con diferentes concentraciones de cloruro de potasio (KCl) en agua purificada (AP) y dura (AD). Tratamiento (T)1.- Steiner en AP; T2.- 3 mmol de KCl en AP; T3.- 6 mmol de KCl en AP; T4.- 9 mmol de KCl en AP; T5.- Steiner en AD; T6.- 3 mmol de KCl en AD; T7.- 6 mmol de KCl en AD; T8.- 9 mmol de KCl en AD. Misma letra en columnas es estadísticamente igual según la prueba de comparación Duncan de rango múltiple ($\alpha = 0.05$). A) Peso seco de raíz; B) Blossom End Rot.

4. DISCUSIÓN

4.1 Respuesta antioxidante ante aplicaciones de KCl

Los valores de IC_{50} en las hojas de tomate aumentó en los tratamientos con 3 y 6 mmol de KCl en agua purificada, indicando una menor actividad antioxidante como respuesta menos adaptativa al estrés inducido por el exceso de sales. Para el tratamiento con 9 mmol de KCl en agua purificada aumento la actividad antioxidante al presentarse disminución en los valores de IC_{50} . Este fenómeno está relacionado con la activación de enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT) y la peroxidasa (POD), que desempeñan un papel crucial en la mitigación del daño oxidativo en condiciones de estrés (Lara et al., 2014). Dichas enzimas antioxidantes mostraron aumento en el trabajo reportado por Habibi et al., 2025, indicando un aumento en la actividad antioxidante ante condiciones media y media-alta de salinidad

en el cultivo de tomate. Por otro lado, Atta et al., 2023 menciona que a concentraciones más bajas de salinidad, las ROS generan una cascada compleja de señalización, y funcionan como mediadores importantes de homeostasis iónica.

Sin embargo, los tratamientos con agua dura no mostraron una disminución significativa en la actividad antioxidante respecto al testigo, lo que podría sugerir que la dureza del agua influye en la capacidad de la planta para manejar el estrés salino, posiblemente al afectar la disponibilidad de cationes esenciales que participan en las rutas de señalización antioxidante.

4.2 Conductancia estomática

La apertura estomática máxima observada en el tratamiento con 6 mmol de KCl en agua purificada muestra una mejora significativa del intercambio gaseoso y de la eficiencia hídrica de la planta. Esto muestra el papel del potasio en la regulación de la apertura estomática y mantener sus funciones fotosintéticas, bajo estrés salino (Sharipova et al., 2022). La capacidad de K para favorecer la hidráulica foliar y estimular acuaporinas coincide con lo reportado en cebada bajo salinidad (Hasanuzzaman et al., 2018).

4.3 Impacto del KCl en el contenido de clorofila

El contenido de clorofila en los folíolos de tomate disminuyó significativamente en los tratamientos con 3, 6 y 9 mmol de KCl en agua purificada en comparación con el testigo. Este hallazgo es consistente con estudios que han reportado que el exceso de sales, como el cloruro de potasio, puede inducir estrés osmótico y reducir la síntesis de clorofila, afectando negativamente la fotosíntesis y el crecimiento vegetal (Temur et al., 2023). Los presentes resultados obtenidos en agua purificada coinciden con lo reportado por Aazami et al., 2021 donde describe la disminución de clorofila al aumentar el nivel de salinidad.

Por otro lado, los tratamientos con agua dura no mostraron diferencias significativas en el contenido de clorofila respecto al testigo, lo que sugiere que la dureza del agua podría mitigar los efectos negativos del KCl sobre la síntesis de clorofila, posiblemente al influir en la disponibilidad de nutrientes y en la regulación osmótica dentro de la planta.

4.4 Efecto del KCl en el contenido de nitrato en pecíolo

Los resultados obtenidos en este estudio indican que las concentraciones de 3 y 6 mmol de KCl en agua purificada aumentaron significativamente el contenido de nitrato en los pecíolos de tomate, mientras que 9 mmol de KCl en agua purificada redujo este contenido. Este patrón sugiere que una concentración elevada de KCl podría interferir con la absorción o asimilación de nitratos, posiblemente debido a un desequilibrio iónico que afecta la actividad de la enzima reductasa de nitrato (NR). Estudios recientes han demostrado que la actividad de NR es crucial para la conversión de nitratos en nitritos y óxido nítrico, compuestos involucrados en la regulación del metabolismo y la respuesta al estrés en plantas de tomate (Xu et al., 2023).

En contraste, los tratamientos con agua dura mostraron niveles de nitrato similares al testigo, lo que podría indicar que la dureza del agua influye en la disponibilidad y absorción de nitratos, posiblemente modulando la actividad de NR y otros mecanismos de transporte iónico.

4.5 Efectos del KCl en el contenido de potasio y calcio

El contenido de calcio en los pecíolos fue mayor en los tratamientos con 3 y 6 mmol de KCl en agua dura en comparación con el testigo, mientras que el tratamiento con 9 mmol en agua dura mostró valores similares al testigo. En contraste, en agua purificada, el contenido de calcio disminuyó significativamente con la concentración de 9 mmol de KCl, indicando una posible interferencia del ion cloruro en la absorción de calcio. Este hallazgo es consistente con estudios que han reportado que el exceso de cloruro puede reducir la disponibilidad de calcio para las plantas (Jaime-Guerrero et al., 2024).

Por otro lado, el contenido de potasio fue mayor en los tratamientos con 9 mmol de KCl en agua purificada, lo que indica una eficiente absorción de este ion bajo condiciones controladas. Sin embargo, en agua dura, el aumento en la concentración

de KCl resultó en un incremento progresivo del contenido de potasio, lo que sugiere que la competencia iónica en suelos con alta concentración de sales puede afectar la eficiencia de absorción de potasio (Karlsons et al., 2023).

Mientras que los cationes limitan, los aniones elevan la absorción de calcio. Cationes como NH_4^+ , K^+ , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} y Na^+ antagonizan, los aniones fosfato y nitrato presentan sinergia con el Ca^{2+} en el sistema radicular. Debido a las valencias de iones, el K^+ es absorbido en mayor cantidad que el Ca^{2+} a pesar de que este último se encuentre en mayores cantidades (Kabir and Díaz-Pérez, 2025).

El aumento de los niveles de sodio genera una disminución de iones como el magnesio, potasio y calcio de acuerdo a lo reportado por (Al Hosni et al., 2024).

4.6 Sodio en peciolo

El aumento progresivo de Na^+ asociado a las dosis con KCl, particularmente en agua dura, sugiere una acumulación iónica incrementada. Sin embargo, el mantenimiento de alta conductancia y buena biomasa radicular indica que las plantas podrían estar gestionando el Na^+ mediante compartimentación o exclusión, en beneficio de la homeostasis K^+/Na^+ . Revisiones recientes apuntan que mecanismos de retención de K^+ en el citosol constituyen una estrategia clave para tolerancia a salinidad (Fujita and Hasanuzzaman, 2022; Raza et al., 2022). El potasio influye en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, permitiendo una asimilación más eficiente de compuestos nitrogenados, aumento en actividad antioxidante y disminución en la toma de Na^+ ante el K^+ (Abbas et al., 2022a). Elevadas concentraciones de sales solubles como el NaCl pueden aumentar el contenido de Na^+ y disminuyendo la absorción de elementos como Ca^{2+} y K^+ (Méndez-Martínez et al., 2025). Estudios reportan la importancia del antitransportador de Na^+ en la membrana plasmática del tomate y el equilibrio osmótico que este proporciona, ya que además de la extrusión de Na^+ de la raíz es vital para la partición de Na^+ en órganos vegetales aumentando la capacidad del tomate para retener Na^+ evitando que el Na^+ se transloque hasta los tejidos fotosintéticos (Olías et al., 2009).

4.7 Incidencia de la pudrición apical del fruto (BER)

La incidencia de BER fue mayor en los tratamientos con 9 mmol de KCl en agua purificada y en agua dura con 6 y 9 mmol, sin diferencias significativas entre estos tratamientos. Estos resultados coinciden con estudios que han señalado que un aumento en la concentración de potasio puede interferir con la absorción de calcio, favoreciendo la aparición de BER (Karlsons et al., 2023).

Además, la relación Ca:K es crucial para la prevención de BER. En este estudio, los tratamientos con 3 mmol de KCl en ambos tipos de agua mostraron una menor incidencia de BER, lo que podría estar relacionado con una mejor relación Ca:K y una mayor disponibilidad de calcio para las plantas (Karlsons et al., 2023).

Algunos elementos se antagonizan mutuamente en la absorción, iones como el K^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ y Na^+ impactan negativamente en la absorción de Ca^{2+} , y aumentando la presencia de BER (Topcu et al., 2022).

4.8 Peso seco de raíz

Un incremento del peso seco de raíz en respuesta a 6 mmol KCl demuestra que esta dosis potencia la proliferación radicular. Se ha documentado que la nutrición con potasio mejora la biomasa en leguminosas y cereales bajo estrés salino, al fomentar rutas de regulación osmótica y producción de osmolitos compatibles (Jēkabsons et al., 2024). En trigo, 10 mM K incrementó hasta 25 % la longitud radicular frente a condiciones salinas (Abbas et al., 2022b). De acuerdo a lo reportado por Gao et al., 2024 el crecimiento radicular en cultivos como el cacahuete se ve disminuido ante estrés salino, pero al agregar calcio exógeno aumentaba dicho crecimiento.

4 CONCLUSIONES

El cloruro de potasio en concentración de 3 mmol contribuye a reducir efectos de estrés salino en tomate, así como la reducción de frutos dañados por BER. Mantiene un equilibrio en cuanto a nitrato, clorofila y actividad antioxidante en hoja.

De acuerdo con los resultados, la concentración de 3 mmol de KCl se recomienda para uso en campo en cultivos de tomate bajo condiciones salinas.

Sin embargo, se recomiendan estudios a mayor escala en campo y con diferentes variedades de tomate para poder disminuir el sesgo científico práctico, y poder determinar con exactitud concentraciones que permitan de manera óptima el crecimiento de los cultivos en condiciones salinas.

Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Contribución de autoría

Conceptualización: (Homero Ramírez Rodríguez, Victor Saul Aguilar Zuluaga, Carlos Rodríguez Cisneros); Curación de datos: (Alejandro Zermeño González, Carlos Rodríguez Cisneros, Victor Saul Aguilar Zuluaga); Análisis formal: (Victor Saul Aguilar Zuluaga, Carlos Rodríguez Cisneros); Adquisición de fondos: (Homero Ramírez Rodríguez, Victor Saul Aguilar Zuluaga, Alejandro Zermeño González); Investigación: (Victor Saul Aguilar Zuluaga, Carlos Rodríguez Cisneros); Metodología: (Carlos Rodríguez Cisneros, Victor Saul Aguilar Zuluaga); Administración del proyecto: (Homero Ramírez Rodríguez, Alejandro Zermeño González, Armando Hernández Pérez); Recursos: (Homero Ramírez Rodríguez, Alejandro Zermeño González, Victor Saul Aguilar Zuluaga, Carlos Rodríguez Cisneros); Software: (Carlos Rodríguez Cisneros, Victor Saul Aguilar Zuluaga, Alejandro Zermeño González); Supervisión: (Homero Ramírez Rodríguez, Carlos Rodríguez Cisneros); Validación: (Homero Ramírez Rodríguez, Alejandro Zermeño González, Armando Hernández Pérez, Carlos Rodríguez Cisneros); Visualización: (Homero Ramírez Rodríguez, Alejandro Zermeño González); Redacción - borrador original: (Victor Saul Aguilar Zuluaga); Redacción - revisión y edición: (Homero Ramírez Rodríguez, Victor Saul Aguilar Zuluaga).

Literatura citada

- Aazami, M.A., Rasouli, F., Ebrahimzadeh, A., 2021. Oxidative damage, antioxidant mechanism and gene expression in tomato responding to salinity stress under in vitro conditions and application of iron and zinc oxide nanoparticles on callus induction and plant regeneration. *BMC Plant Biol* 21, 597. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03379-7>
- Abbas, G., Rehman, S., Siddiqui, M.H., Ali, H.M., Farooq, M.A., Chen, Y., 2022a. Potassium and Humic Acid Synergistically Increase Salt Tolerance and Nutrient Uptake in Contrasting Wheat Genotypes through Ionic Homeostasis and Activation of Antioxidant Enzymes. *Plants* 11, 263. <https://doi.org/10.3390/plants11030263>
- Abbas, G., Rehman, S., Siddiqui, M.H., Ali, H.M., Farooq, M.A., Chen, Y., 2022b. Potassium and Humic Acid Synergistically Increase Salt Tolerance and Nutrient Uptake in Contrasting Wheat Genotypes through Ionic Homeostasis and Activation of Antioxidant Enzymes. *Plants* 11, 263. <https://doi.org/10.3390/plants11030263>
- Adarsh, H., Lekshmi, S., Sarada, S., Mini, V., Nisha, S., Preethisree, P., 2025. Evaluation of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) genotypes for salinity tolerance. *Int. J. Adv. Biochem. Res.* 9, 947–950. <https://doi.org/10.33545/26174693.2025.v9.i12S1.6640>



- Al Hosni, A.S., Joyce, D., Hunter, M., Perkins, M., Al Yahyai, R., 2024. Altered Calcium and Potassium Distribution Maps in Tomato Tissues Cultivated Under Salinity: Studies Using X-Ray Fluorescence (Xfm) Microscopy. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4753268>
- Atta, K., Mondal, Saptarshi, Gorai, S., Singh, A.P., Kumari, A., Ghosh, T., Roy, A., Hembram, S., Gaikwad, D.J., Mondal, Subhasis, Bhattacharya, S., Jha, U.C., Jespersen, D., 2023. Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. *Front. Plant Sci.* 14, 1241736. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736>
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E., Berset, C., 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology* 28, 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Cialli, S., Trivellini, A., Carmassi, G., Incrocci, L., Mensuali, A., 2025. Identifying salt-tolerant traits in *Solanum pimpinellifolium* through in vitro screening to enhance crop resilience. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 163, 55. <https://doi.org/10.1007/s11240-025-03183-3>
- Enríquez-Acosta, E.A., Ledea-Rodríguez, J.L., Carballo-Méndez, F. de J., Ruiz-Espinoza, F.H., Beltrán-Morales, F.A., 2025. Silicon And Its Relationship With Germination And Related Indices In Varieties Of *Solanum lycopersicum* L. Under Salinity Conditions Silicio y su Relación con la Germinación e Índices Relacionados en Variedades de *Solanum lycopersicum* L. en Condiciones de Salinidad. . e.
- Enríquez-Acosta, E.A., Ruiz-Espinoza, F.H., Carballo-Méndez, F.D.J., Beltrán-Morales, F.A., Vázquez-Vázquez, C., García-Sánchez, H.D., 2023. El silicio como mitigador a salinidad en las variables fisiológicas de germinación de tres variedades de *Solanum lycopersicum*. *Remexca* 14, 85–96. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i1.3385>
- Fujita, M., Hasanuzzaman, M., 2022. Approaches to Enhancing Antioxidant Defense in Plants. *Antioxidants* 11, 925. <https://doi.org/10.3390/antiox11050925>
- Gao, Y., Dong, X., Wang, R., Hao, F., Zhang, H., Zhang, Y., Lin, G., 2024. Exogenous Calcium Alleviates Oxidative Stress Caused by Salt Stress in Peanut Seedling Roots by Regulating the Antioxidant Enzyme System and Flavonoid Biosynthesis. *Antioxidants* 13, 233. <https://doi.org/10.3390/antiox13020233>
- Gupta, R., Gujrathi, S., Sharma, S., Bharadwaj, S., 2025. Optical Spectroscopic Imaging for Early Detection of Salinity Stress in Plants: A Review.
- Habibi, N., Aryan, S., Sediqi, N., Terada, N., Sanada, A., Kamata, A., Koshio, K., 2025. Enhancing Salt Tolerance in Tomato Plants Through PEG6000 Seed Priming: Inducing Antioxidant Activity and Mitigating Oxidative Stress. *Plants* 14, 1296. <https://doi.org/10.3390/plants14091296>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M., Nahar, K., Hossain, Md., Mahmud, J., Hossen, Md., Masud, A., Moumita, Fujita, M., 2018. Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. *Agronomy* 8, 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Ignacio Orona Castillo, I.O.C., Carmen Lizette Del-Toro-Sánchez, C.L.D.-T.-S., Manuel Fortis Hernández, M.F.H., Pablo Preciado Rangel, P.P.R., José De Jesús Espinoza Arellano, J.D.J.E.A., Rueda Puente, E.O., Misael Flores Vázquez, M.F.V., Pedro Cano Ríos, P.C.R., 2022. Indicadores técnico-económicos de la producción del cultivo de tomate bajo agricultura protegida en la Comarca Lagunera, México: Indicadores técnico-económicos del cultivo de tomate bajo agricultura protegida en la Comarca Lagunera, México. *BIOTECNIA* 24, 70–76. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1721>
- Jaime-Guerrero, M., Álvarez-Herrera, J.G., Fischer, G., 2024. Effect of calcium on fruit quality: A review. *Agron. Colomb.* 42, e112026. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v42n1.112026>
- Jêkabson, A., Karlsons, A., Osvalde, A., Ievinsh, G., 2024. Effect of Na, K and Ca Salts on Growth, Physiological Performance, Ion Accumulation and Mineral Nutrition of *Mesembryanthemum crystallinum*. *Plants* 13, 190. <https://doi.org/10.3390/plants13020190>
- Kabir, Md.Y., Díaz-Pérez, J.C., 2025. Calcium Route in the Plant and Blossom-End Rot Incidence. <https://doi.org/10.20944/preprints202506.0305.v1>



- Karlsons, A., Osvalde, A., Cekstere, G., Āboliņa, L., 2023. Effects of Ca Sprays on Fruit Ca Content and Yield of Tomato Variety Susceptible to Blossom-End Rot. *Plants* 12, 1640. <https://doi.org/10.3390/plants12081640>
- Lara, T.S., Lira, J.M.S., Rodrigues, A.C., Rakocevic, M., Alvarenga, A.A., 2014. Potassium Nitrate Priming Affects the Activity of Nitrate Reductase and Antioxidant Enzymes in Tomato Germination. *JAS* 6, p72. <https://doi.org/10.5539/jas.v6n2p72>
- Leyva-Morales, J.B., Bastidas-Bastidas, P.D.J., Rodríguez-Aguilar, B.A., Davizon, Y.A., Márquez-Pacheco, H., Amillano-Cisneros, J.M., Godínez-Siardia, D.E., Lorente Adame, R.G., González-Márquez, L.-C., Leyva Camacho, L., Salvatierra-Stamp, V.D.C., 2025. Evaluación del riesgo a la salud por la exposición a plaguicidas a través del consumo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), en Guasave, Sinaloa, México. *RICA* 41. <https://doi.org/10.20937/RICA.55136>
- Liu, Y., Zheng, J., Ge, L., Xin, X., Li, X., Shi, Q., Zhang, Y., 2024. Slsams1 Improves Carbon and Nitrogen Metabolism in Tomato Under Salt Stress. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4906119>
- Méndez-Martínez, M., Juárez-Maldonado, A., Benavides-Mendoza, A., González-Morales, S., López-Pérez, M.C., Pérez-Labrada, F., 2025. Citric acid–modified coconut shell biochar mitigates saline–alkaline stress in *Solanum lycopersicum* L. by modulating enzyme activity in the plant and soil. *Open Agriculture* 10, 20250474. <https://doi.org/10.1515/opag-2025-0474>
- Olías, R., Eljakaoui, Z., Pardo, J.M., Belver, A., 2009. The Na⁺/H⁺ exchanger SOS1 controls extrusion and distribution of Na⁺ in tomato plants under salinity conditions. *Plant Signaling & Behavior* 4, 973–976. <https://doi.org/10.4161/psb.4.10.9679>
- Raza, A., Salehi, H., Rahman, M.A., Zahid, Z., Madadkar Haghjou, M., Najafi-Kakavand, S., Charagh, S., Osman, H.S., Albaqami, M., Zhuang, Y., Siddique, K.H.M., Zhuang, W., 2022. Plant hormones and neurotransmitter interactions mediate antioxidant defenses under induced oxidative stress in plants. *Front. Plant Sci.* 13, 961872. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.961872>
- Ronen, E., Chemicals, H., 2010. Nitrato de Potasio. Una Solución Posible para los Problemas de Salinidad.
- Ruiz-Ramirez, S., Sánchez-Lucio, R., Zelaya-Molina, L.X., Chávez-Díaz, I.F., Cruz-Cárdenas, C.I., Valdivia-Bernal, R., 2021. Germination and vigor of seeds of horticultural species, inoculated with biofertilizers and saline solutions 12.
- Sharipova, G., Ivanov, R., Veselov, D., Akhiyarova, G., Seldimirova, O., Galin, I., Fricke, W., Vysotskaya, L., Kudoyarova, G., 2022. Effect of Salinity on Stomatal Conductance, Leaf Hydraulic Conductance, HvPIP2 Aquaporin, and Abscisic Acid Abundance in Barley Leaf Cells. *IJMS* 23, 14282. <https://doi.org/10.3390/ijms232214282>
- Soto-Bravo, F., 2025. Estrategias de manejo del riego y la nutrición en tomate hidropónico bajo invernadero: efecto en el rendimiento y la eficiencia hídrica. *TM*. <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7652>
- Temur, B., Akhoundnejad, Y., Nas, Y., Ersoy, L., 2023. Effect of different potassium fertilizers on yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under drought stress conditions. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences* 7, 761–769. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2023.4.5>
- Topcu, Y., Nambeesan, S.U., Van Der Knaap, E., 2022. Blossom-end rot: a century-old problem in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and other vegetables. *Mol Horticulture* 2, 1. <https://doi.org/10.1186/s43897-021-00022-9>
- Urias-Salazar, A.A., Poot-Poot, W.A., Ayil-Gutiérrez, B.A., Delgado-Martínez, R., Silva-Espinosa, J.H.T., Segura-Martínez, Ma.T.D.J., 2022. Cultivo de tejidos vegetales y mutagénesis inducida: una estrategia para el desarrollo de plantas tolerantes a salinidad. *IyCUAA*. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2022853315>
- Xu, H., Kong, M., Ali, Q., Jing, H., Wang, F., Xu, Q., Li, F., Gu, J., Shen, Y., 2023. Nitrate Reductase Drives Nutrition Control and Disease Resistance in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivars. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3001684/v1>



Yang, Y., Guo, Y., 2018. Elucidating the molecular mechanisms mediating plant salt-stress responses. *New Phytologist* 217, 523–539. <https://doi.org/10.1111/nph.14920>

Zuchi, S., Picarella, M.E., Soressi, G.P., Astolfi, S., 2010. Salt Stress: Effects on Nitrogen Metabolism in Tomato Plants Differing in Salt Tolerance.

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Universitas Agri ni de sus editores. Universitas Agri y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

