




Efecto del ácido abscísico y 24-epibrasinólida en el estado nutricional del tomate bajo deficiencia de calcio

Effect of abscisic acid and 24-epibrassinolide on the nutritional status of tomato under calcium deficiency

Ana Bell Sánchez-Aguilar¹ , Manuel Sandoval-Villa^{1*} , Libia Iris Trejo-Téllez¹ , Javier Suárez-Espinosa¹ 

¹Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, CP. 56264. Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: msandoval@colpos.mx

Artículo científico

Recibido: 03 de febrero 2026

Aceptado: 08 de mayo 2026

RESUMEN. El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la segunda hortaliza más cultivada a nivel mundial. La deficiencia de calcio, un estrés abiótico recurrente, provoca alteraciones fisiológicas que comprometen el estado nutricional del cultivo y por tanto el rendimiento. Para contrarrestar esta problemática, se ha propuesto el uso de reguladores de crecimiento vegetal. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del ácido abscísico (ABA) y 24-epibrasinólida (EBL) en el estado nutricional del tomate bajo deficiencia de calcio (45 mg L⁻¹). Se estableció un experimento factorial 4 x 4 completamente al azar. Se evaluaron cuatro concentraciones de ABA (0, 60, 100 y 140 mg L⁻¹) y cuatro de EBL (0, 0.0024, 0.0048 y 0.0096 mg L⁻¹) como factores. Las concentraciones foliares de nitrógeno, magnesio, azufre y boro aumentaron significativamente con ABA2EBL1 (100 y 0.0024 mg L⁻¹), mientras que, para fósforo y manganeso ABA2EBL0 (100 y 0 mg L⁻¹) mostró el mejor desempeño. En frutos, los tratamientos ABA1EBL0 (60 y 0 mg L⁻¹) y ABA3EBL0 (140 y 0 mg L⁻¹), permitieron las mayores concentraciones nutrimentales en la primera evaluación. En la segunda evaluación, ABA3EBL0 favoreció las concentraciones de fósforo, magnesio y boro, mientras que ABA2EBL0 destacó en manganeso. En la tercera evaluación, el efecto positivo de la mayoría de los tratamientos fue menor. Los resultados demuestran que las aplicaciones de ABA y EBL favorecen la concentración de macro y micronutrientes en frutos de tomate durante la fase de producción intermedia, específicamente en plantas con deficiencia de calcio.

Palabras clave: Reguladores de crecimiento, estrés abiótico, desórdenes fisiológicos, nutrición vegetal.

ABSTRACT. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the second most widely cultivated vegetable worldwide. Calcium deficiency, a recurring abiotic stress, causes physiological alterations that compromise the nutritional status of the crop and, consequently, its yield. To counteract this issue, the use of plant growth regulators has been proposed. The objective of this research was to evaluate the effect of abscisic acid (ABA) and 24-epibrassinolide (EBL) on the nutritional status of tomatoes under calcium deficiency (45 mg L⁻¹). A 4 x 4 completely randomized factorial experiment was established. Four concentrations of ABA (0, 60, 100 y 140 mg L⁻¹) and four of EBL (0, 0.0024, 0.0048 y 0.0096 mg L⁻¹) were evaluated as factors. Foliar concentrations of nitrogen, magnesium, sulfur, and boron increased significantly with ABA2EBL1 (100 y 0 mg L⁻¹), while ABA2EBL0 (100 y 0 mg L⁻¹) showed the best response for phosphorus and manganese. In fruits, the treatments ABA1EBL0 (60 y 0 mg L⁻¹) and ABA3EBL0 (140 y 0 mg L⁻¹) resulted in the highest nutritional concentrations during the first evaluation. In the second evaluation, ABA3EBL0 favored the concentrations of phosphorus, magnesium, and boron, while ABA2EBL0 stood out regarding manganese. In the third evaluation, the positive effect of most treatments was lower. The results demonstrate that the application of ABA and EBL promotes the concentration of macro and micronutrients in tomato fruits during the intermediate production phase, specifically in plants with calcium deficiency.

Keywords: Growth regulators, abiotic stress, physiological disorders, plant nutrition.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la agricultura enfrenta el desafío de satisfacer la demanda alimentaria global en constante aumento por la expansión demográfica (Khatri *et al.* 2024) y, combatir el efecto negativo del cambio climático que provoca diversas tensiones abióticas que afectan el crecimiento de los cultivos y comprometen la productividad agrícola, en consecuencia, la seguridad alimentaria global (Seleiman y Kheir 2018).

Los cultivos hortícolas desempeñan un papel fundamental en la seguridad alimentaria y nutricional, especialmente en los países en desarrollo (Ahmed *et al.* 2024). La producción mundial de hortalizas aumentó 26% desde 2010, alcanzando 1 200 millones de toneladas en 2023, en el mismo año, el tomate se clasificó como la hortaliza más producida con 192 millones de toneladas (FAO 2024). México se posicionó como el principal exportador de tomate a nivel mundial, destinando 89 637 ha, con un rendimiento de 49.03 Mg ha⁻¹ y una producción de 4 394 806.98 Mg (FAOSTAT 2023). Sinaloa, Baja California Sur, Sonora y Michoacán, son los principales estados productores, aportan el 77.5% de la producción nacional (SIAP 2022).

La producción de tomate es afectada por varios factores, entre ellos resaltan los desórdenes fisiológicos, provocados por diversos agentes abióticos (Mishra 2021). La pudrición apical es uno de los desórdenes fisiológicos más devastadores que afecta la producción hortícola mundial (Topcu *et al.* 2022). Es resultado de una deficiencia de calcio (Ca) ocasionada por una limitada translocación del elemento al fruto (Díaz-Pérez y Hook 2017).

Este elemento es un componente estructural de la pared celular, importante mensajero intracelular que media las respuestas a fitohormonas, señales de estrés, mantiene el equilibrio iónico y actúa como contraión de aniones orgánicos e inorgánicos en la vacuola y el citosol (Kabir y Díaz-Pérez 2025). Actualmente las estrategias para mitigar la deficiencia de Ca en la planta basadas únicamente en la fertilización mineral suelen ser insuficientes (Kabir y Díaz-Pérez 2025), debido a la nula movilidad de Ca en el floema, este elemento no se puede translocar desde los órganos fuente a los órganos demanda (Gao *et al.* 2020). Por lo cual, hay un vacío por explorar, la capacidad de reguladores de crecimiento vegetal para modular la absorción y distribución iónica en condiciones limitantes.

En este sentido, la participación de ciertas hormonas vegetales como las auxinas, ácido abscísico (ABA) y brasinoesteroides (BR) en la mitigación del estrés está documentado ampliamente (Shahzad *et al.* 2018). Los BR confieren resistencia a las plantas frente a una amplia gama de estreses bióticos y abióticos (Bukhari *et al.* 2016). Entre ellos, la 24-epibrasinólida (EBL) aplicada de manera exógena ha demostrado mejorar el crecimiento, atributos fotosintéticos, acumulación de osmolitos bajo condiciones de estrés (Ahmad *et al.* 2018), además, mejora rendimiento y calidad en frutos (Ali *et al.* 2022). Por su parte, el ácido abscísico regula diversos procesos, desempeña un papel crucial en la mitigación de los efectos negativos del estrés abiótico mediante el cierre estomático, la regulación de la expresión génica, síntesis de metabolitos protectores y otros procesos bioquímicos (Bulgakov y Koren 2022). Actualmente, se utiliza para reducir el daño de la pudrición apical, centrándose en adaptar las plantas a un ambiente restrictivo (Riboldi *et al.* 2018). Por lo anterior, el

objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del ABA y EBL en el estado nutricional del tomate bajo deficiencia de calcio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

Este estudio se realizó en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, ubicado a 19° 27' 51" LN y 98° 54' 15" LO, a una altitud de 2 250 m. El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero en un área de 96 m². La ventilación consistió en dos cortinas laterales y una cortina cenital protegida con malla antiáfidos de 25 hilos por pulgada. La temperatura mínima promedio fue de 5.7 °C y la máxima de 41.9 °C, con una humedad relativa de 33%. El invernadero y el material de tutoro (anillos y ganchos) se desinfectaron con sales de amonio cuaternario (Aniba Plus, México) diluidas en agua a una dosis de 0.2 mL L⁻¹.

Material genético

Se sembraron semillas del híbrido de tomate "El Cid" en una bandeja de poliestireno expandido de 200 pocillos llenados con turba (Kekkila®, Finlandia) como sustrato. El agua de riego utilizada para preparar la solución nutritiva Steiner (SNS) registró una conductividad eléctrica (CE) de 0.44 dS m⁻¹ durante todo el ciclo del cultivo. El agua de riego contenía las siguientes especies químicas disueltas, expresadas en mg L⁻¹: K⁺ = 3.52, Ca²⁺ = 15.83, Mg²⁺ = 16.66, Na⁺ = 60.49, H₂PO₄⁻ = 1.27, SO₄²⁻ = 0.91, HCO₃⁻ = 306.22, Cl⁻ = 0.01, H₃BO₃ = 0.46, Cu²⁺ = 0.02 y Zn²⁺ = 0.004. La SNS completa contenía los siguientes macronutrientes, expresados en miliequivalentes por litro (meq L⁻¹): NO₃⁻ = 12, H₂PO₄⁻ = 1, SO₄²⁻ = 7, K⁺ = 7, Ca²⁺ = 9 y Mg²⁺ = 4. Las concentraciones de SNS aplicadas durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo se ajustaron en función de esta solución completa. Los fertilizantes utilizados para la preparación de la SNS en las distintas concentraciones incluyeron nitrato de calcio [Ca(NO₃)₂·4H₂O] (YaraTera®, CALCINIT, Madrid, España), sulfato de potasio (K₂SO₄) (Ultrasol® NKS 46, SQM, Chile), fosfato monopotásico (KH₂PO₄) (Ultrasol® MKP, SQM, Chile), sulfato de magnesio (MgSO₄·7H₂O) (Sulmag Sal Epsom®, Peñoles, México) y una mezcla de microelementos (Tradecorp AZ®, Tradecorp, España), expresados en porcentaje (%): Fe = 7.5, Mn = 3.5, Zn = 0.70, Cu = 0.28, B = 0.65 y Mo = 0.26.

El trasplante se realizó 40 días después de la siembra. El régimen de riego se ajustó según la etapa fenológica de la planta: durante el crecimiento inicial, el riego se aplicó 1 min h⁻¹; durante la etapa vegetativa, 2 min cada 2 h; durante la floración y fructificación, 3 min cada 2 h; y durante la maduración, 4 min cada 2 h. El gasto promedio de agua por gotero fue de 23.8 mL min⁻¹.

Diseño experimental y tratamientos

El experimento se realizó con un arreglo factorial 4 × 4 en un diseño experimental completamente al azar. Los factores evaluados fueron: ácido abscísico (ABA), proveniente del producto comercial (PC) de la marca Nutrigota (5%, Guanajuato, México), y 24-epibrasinolida (EBL), proveniente de Sigma-Aldrich (85%, Misuri, EE. UU.), con cuatro niveles cada uno. Las concentraciones de ABA utilizadas fueron 0 mg L⁻¹ (ABA0), 60 mg L⁻¹ (ABA1), 100 mg L⁻¹ (ABA2) y 140 mg L⁻¹ (ABA3). En el

caso de EBL, las concentraciones fueron de 0 mg L⁻¹ (EBL0), 0.0024 mg L⁻¹ (EBL1), 0.0048 mg L⁻¹ (EBL2) y 0.0096 mg L⁻¹ (EBL3).

Se establecieron 16 tratamientos, correspondientes a las combinaciones de niveles de ABA y EBL, aplicados a plantas con nivel reducido de Ca²⁺ en la solución nutritiva (45 mg L⁻¹), complementado con el Ca²⁺ en el agua de riego (15.8 mg L⁻¹). De-Freitas *et al.* (2013) indicaron que una concentración de 90 mg L⁻¹ de Ca²⁺ suministrada a plantas de tomate durante la floración, representa una dosis baja para sus requerimientos. Para el cultivo de tomate en la fase reproductiva se considera que una concentración de 180 mg L⁻¹ de Ca²⁺ es suficiente para cubrir los requerimientos nutricionales óptimos (Steiner 1984). En este estudio, se seleccionó un suministro del 25% a través de fertilizantes como criterio de deficiencia en etapas previas a la aplicación de los tratamientos. Este nivel se eligió con el fin de inducir un estrés nutricional severo que permitiera evaluar la eficacia de los reguladores de crecimiento frente a un ambiente restrictivo a los 99, 106 y 113 días después del trasplante (ddt). Cada tratamiento fue replicado en cuatro unidades experimentales independientes, lo que representó un total de 64 unidades experimentales. La unidad experimental consistió en una planta de tomate sembrada en una bolsa negra de polietileno de 13 L.

Desarrollo del experimento

Las plántulas se regaron con SNS a una CE de 0.69 dS m⁻¹, con el pH ajustado a 5.5. Posteriormente al trasplante, las plantas se regaron con una SNS al 25% (CE 0.94 dS m⁻¹ y pH 5.5). Después de 23 días del trasplante (ddt), la concentración de SNS aumentó al 50% (CE 1.44 dS m⁻¹). A los 43 ddt, se preparó una SNS al 100% de su concentración (excepto la concentración de Ca). La mitad del Ca se suministró con fertilizantes (90 mg L⁻¹) y se complementó con el Ca²⁺ aportado por el agua (15.8 mg L⁻¹). Los macro y micronutrientes restantes se suministraron según los requerimientos de una SNS completa. Con el 50% del requerimiento de Ca²⁺, la CE fue de 2.34 dS m⁻¹.

Tres meses después del trasplante, se redujo la cantidad de Ca²⁺ (45 mg L⁻¹). Al modificar la cantidad de Ca²⁺ al 25% en la SNS, la CE fue de 2.24 dS m⁻¹. Bajo estas condiciones de deficiencia inducida se realizó la aplicación foliar de los tratamientos. A los 99 ddt, cuando el quinto racimo estaba en antesis, se realizó la primera aplicación de los tratamientos. Con un atomizador se rociaron 125 mL de la solución por planta al tallo, hojas e inflorescencia. El volumen aplicado estuvo en función del tamaño de la planta. Antes del inicio de los tratamientos, se hicieron pruebas con diferentes dosis para saber en qué punto el líquido era retenido por la planta sin gotear. Para evitar que hubiera deriva del producto hacia otras plantas durante la aplicación, se cubrió la planta objetivo con una cortina de plástico. A los 106 y 113 ddt, cuando el sexto y séptimo racimo estaban en antesis, respectivamente, se realizó la segunda y tercera aplicación de los tratamientos. Todas las aplicaciones se hicieron por la mañana. Para la preparación de los tratamientos se usó agua destilada. El pH que se manejó en los tratamientos estuvo en un rango de 4.65 a 5.5 en las diferentes aplicaciones.

Variables evaluadas

Se determinó la concentración de macro y microelementos en frutos de los racimos 5, 6 y 7 a los 119, 126 y 133 ddt. Con la finalidad de tener suficiente material vegetal para las determinaciones, las evaluaciones se hicieron cinco días después de lo recomendado por Riboldi *et al.* (2018), es decir,

a los 20 días después de cada aplicación. El muestreo foliar se realizó a los 133 ddt, se tomó la hoja ubicada enseguida del séptimo racimo en cada planta. En cada evaluación se tomaron dos frutos por cada planta. Cada tratamiento presentó cuatro repeticiones, en total, se secaron ocho frutos por tratamiento en cada evaluación. Los frutos de cada evaluación fueron secados, además, una hoja de cada planta (única evaluación) a 72 °C durante 72 h en una estufa de aire forzado (Riossa® HCF-125D, México). Previo al secado, los frutos se cortaron en cuatro partes para facilitar la deshidratación del tejido y posteriormente la molienda. Después, cada una de las muestras se molió hasta obtener partículas menores a 2 mm, la molienda se realizó por cada racimo. Finalmente, las muestras fueron guardadas en bolsas de papel estraza con su respectiva etiqueta para el análisis nutrimental.

Análisis nutrimental

La determinación de nitrógeno (N) total de las muestras se realizó por el método micro Kjeldahl con modificaciones (Alcántar y Sandoval 1999). Mientras que, la determinación del resto de los macronutrientes fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre(S) y los micronutrientes manganeso (Mn) y boro (B) para frutos y hojas se realizó mediante digestión húmeda según Alcántar y Sandoval (1999). Los extractos se analizaron mediante espectroscopía de emisión óptica de plasma de inducción (ICP-OES 725-ES, Agilent Technologies, Inc.; Santa Bárbara, CA, EE. UU.).

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante un análisis de varianza. Se hicieron pruebas de homogeneidad de varianzas y normalidad. Cuando se rechazó la hipótesis nula, se realizaron comparaciones *post hoc* con la prueba de Tukey con $\alpha = 0.05$. Todos los análisis se realizaron con el programa R versión 4.3.1 (R Core Team 2023).

RESULTADOS

Concentración de N, P y K en frutos y hojas de tomate

La aplicación de ABA y EBL solos o combinados no presentaron diferencias significativas en la concentración de N en frutos (Tabla 1) de los racimos 5 y 6. Sin embargo, en frutos del racimo 7, el tratamiento ABA2EBL0 ($22.050 \pm 0.99 \text{ g kg}^{-1}$) registró la mayor concentración de N, aunque no presentó diferencias significativas con el testigo ($19.775 \pm 0.88 \text{ g kg}^{-1}$). En la concentración de N en hojas, si hubo diferencias significativas. El tratamiento ABA2EBL1 ($39.550 \pm 0.70 \text{ g kg}^{-1}$) tuvo la mejor respuesta, en comparación con el testigo ($29.283 \pm 3.59 \text{ g kg}^{-1}$) y con los tratamientos ABA0EBL2 ($30.100 \pm 2.58 \text{ g kg}^{-1}$), ABA3EBL0 ($31.150 \pm 1.51 \text{ g kg}^{-1}$), ABA3EBL1 ($28.700 \pm 1.76 \text{ g kg}^{-1}$), ABA3EBL2 ($31.325 \pm 2.01 \text{ g kg}^{-1}$) y ABA3EBL3 ($29.750 \pm 1.40 \text{ g kg}^{-1}$) (datos no presentados).

La concentración de P y K en frutos de los racimos 5, 6 y 7 y en hojas fue afectada significativamente por la aplicación de los reguladores de crecimiento, aplicados de manera individual o en combinación (Tabla 2).

Tabla 1. ANOVA de la concentración de nitrógeno en frutos (119, 126 y 133 ddt) y hojas (133 ddt) de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tratadas con reguladores de crecimiento.

FV	Nitrógeno							
	Racimo 5		Racimo 6		Racimo 7		Hoja	
	CM	P-Value	CM	P-Value	CM	P-Value	CM	P-Value
ABA	0.0451	0.1276	0.0451	0.2936	0.0392	0.0093	0.5257	0.0001
EBL	0.0155	0.5636	0.0848	0.0801	0.1021	1.56E-05	0.1714	0.0451
ABA*EBL	0.0434	0.0734	0.0298	0.5811	0.0413	1.56E-05	0.1941	0.0039
ERROR	0.0225		0.0354		0.0090		0.0589	

FV: fuente de variación y CM: cuadrado medio.

Tabla 2. Concentración de fósforo y potasio en frutos (119, 126 y 133 ddt) y hojas (133 ddt) de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tratadas con reguladores de crecimiento.

Combinación	Fósforo (g kg ⁻¹ biomasa seca)			
	Racimo 5 ¹	Racimo 6 ²	Racimo 7 ³	Hoja
ABA0EBL0	2.159 ^d	2.363 ^{cd}	2.742 ^{ab}	2.059 ^{bcde}
ABA0EBL1	2.977 ^{ab}	2.465 ^{abc}	2.508 ^{bcd}	2.265 ^{bcd}
ABA0EBL2	3.039 ^{ab}	2.461 ^{abc}	2.358 ^{bcde}	1.905 ^{def}
ABA0EBL3	2.872 ^{ab}	2.407 ^{bcd}	2.405 ^{bcd}	2.292 ^{bc}
ABA1EBL0	3.145 ^a	2.459 ^{abcd}	2.602 ^{abc}	2.009 ^{bcde}
ABA1EBL1	2.624 ^{bc}	2.790 ^{ab}	2.401 ^{bcd}	1.940 ^{cdef}
ABA1EBL2	2.947 ^{ab}	2.447 ^{abcd}	2.715 ^{ab}	1.807 ^{ef}
ABA1EBL3	2.915 ^{ab}	2.249 ^{cd}	2.418 ^{bcd}	2.142 ^{bcde}
ABA2EBL0	2.916 ^{ab}	2.492 ^{abc}	3.006 ^a	2.957 ^a
ABA2EBL1	2.821 ^{ab}	2.053 ^d	2.214 ^{cde}	2.115 ^{bcde}
ABA2EBL2	2.699 ^{bc}	2.787 ^{ab}	2.544 ^{bc}	2.363 ^b
ABA2EBL3	2.357 ^{cd}	2.588 ^{abc}	2.457 ^{bcd}	1.815 ^{ef}
ABA3EBL0	2.825 ^{ab}	2.813 ^a	2.651 ^{ab}	1.842 ^{ef}
ABA3EBL1	2.852 ^{ab}	2.603 ^{abc}	2.388 ^{bcd}	2.008 ^{bcde}
ABA3EBL2	2.793 ^{ab}	2.452 ^{abcd}	1.960 ^e	1.948 ^{cdef}
ABA3EBL3	2.835 ^{ab}	2.575 ^{abc}	2.104 ^{de}	1.624 ^f
DMSH _{0.05}	0.417	0.392	0.425	0.374

Combinación	Potasio (g kg ⁻¹ biomasa seca)			
	Racimo 5 ¹	Racimo 6 ²	Racimo 7 ³	Hoja
ABA0EBL0	13.813 ^a	5.309 ^{ab}	4.964 ^{ab}	6.002 ^b
ABA0EBL1	13.306 ^{ab}	6.960 ^{ab}	6.915 ^a	5.575 ^b
ABA0EBL2	12.070 ^{abc}	6.507 ^{ab}	5.663 ^{ab}	6.125 ^b
ABA0EBL3	10.032 ^{cde}	5.476 ^{ab}	5.683 ^{ab}	4.831 ^b
ABA1EBL0	10.799 ^{bcd}	3.898 ^b	4.190 ^b	5.455 ^b
ABA1EBL1	7.794 ^{efg}	9.029 ^a	4.175 ^b	6.808 ^{ab}
ABA1EBL2	8.940 ^{def}	6.513 ^{ab}	6.663 ^{ab}	9.663 ^a
ABA1EBL3	8.804 ^{def}	5.761 ^{ab}	5.571 ^{ab}	6.015 ^b
ABA2EBL0	8.836 ^{def}	6.979 ^{ab}	4.908 ^{ab}	5.623 ^b
ABA2EBL1	9.071 ^{cdef}	8.722 ^a	6.206 ^{ab}	7.141 ^{ab}
ABA2EBL2	7.996 ^{efg}	7.242 ^{ab}	6.096 ^{ab}	6.276 ^b
ABA2EBL3	5.344 ^g	5.944 ^{ab}	5.331 ^{ab}	5.661 ^b
ABA3EBL0	7.283 ^{efg}	5.299 ^{ab}	5.655 ^{ab}	5.479 ^b
ABA3EBL1	6.257 ^{fg}	5.951 ^{ab}	6.221 ^{ab}	5.650 ^b
ABA3EBL2	6.057 ^{fg}	5.445 ^{ab}	5.115 ^{ab}	5.848 ^b
ABA3EBL3	7.181 ^{efg}	5.074 ^{ab}	4.347 ^{ab}	6.498 ^{ab}
DMSH _{0.05}	3.269	4.762	2.687	3.016

ABA: Ácido abscisico y EBL: 24-epibrasinólida. ABA0: 0 mg L⁻¹; ABA1: 60 mg L⁻¹; ABA2: 100 mg L⁻¹; ABA3: 140 mg L⁻¹; EBL0: 0 mg L⁻¹; EBL1: 0.0024 mg L⁻¹; EBL2: 0.0048 mg L⁻¹; EBL3: 0.0096 mg L⁻¹; 1: Primera evaluación; 2: Segunda evaluación y 3: Tercera evaluación. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

En el racimo 5, el tratamiento ABA1EBL0 presentó la concentración más alta de P, mostrando diferencias respecto al testigo y a los tratamientos ABA1EBL1, ABA2EBL2 y ABA2EBL3 (Tabla 2). Para el racimo 6, el tratamiento ABA3EBL0 mostró la mayor concentración de P y tuvo diferencias respecto al testigo y los tratamientos ABA0EBL3, ABA1EBL3 y ABA2EBL1. En el racimo 7, el tratamiento ABA2EBL0 tuvo la mayor concentración de P, pero no mostró diferencias respecto al testigo. Con la nula aplicación de EBL, las dosis de ABA no modificaron significativamente la concentración de P. En la concentración de P en hoja, el tratamiento ABA2EBL0 presentó la mejor respuesta, mostrando diferencias con el resto de los tratamientos.

En la primera evaluación (racimo 5), el testigo mostró la mayor concentración de K, la cual disminuyó significativamente al incrementar las dosis de ABA y EBL (Tabla 2). Las aplicaciones de ABA y EBL no modificaron significativamente la concentración de K en los frutos de los racimos 6 y 7. En cuanto a la concentración de K en hoja, el tratamiento ABA1EBL2 mostró la mayor concentración de K, presentando diferencias con el resto de los tratamientos, con excepción de ABA1EBL1, ABA2EBL1 y ABA3EBL3.

Concentración de Mg y S en frutos y hojas de tomate

La concentración de Mg y S en los frutos de tomate en las tres evaluaciones disminuyó a través del tiempo (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Concentración de magnesio en frutos (119, 126 y 133 ddt) y hojas (133 ddt) de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tratadas con reguladores de crecimiento.

Combinación	Magnesio (g kg ⁻¹ biomasa seca)			
	Racimo 5 ¹	Racimo 6 ²	Racimo 7 ³	Hoja
ABA0EBL0	0.838 ^e	0.984 ^e	1.069 ^a	6.989 ^{ighi}
ABA0EBL1	1.176 ^{abc}	1.030 ^{cd} ^e	0.967 ^{abcd}	6.300 ⁱ
ABA0EBL2	1.103 ^{abcd}	0.994 ^d ^e	0.919 ^{cde}	6.802 ^{ghi}
ABA0EBL3	1.080 ^{bcd}	0.949 ^e	0.857 ^e	6.392 ^{hi}
ABA1EBL0	1.224 ^a	1.032 ^{bcd} ^e	0.966 ^{abcd}	7.374 ^{defg}
ABA1EBL1	1.103 ^{abcd}	1.154 ^{ab}	1.007 ^{abc}	7.990 ^{bcd} ^e
ABA1EBL2	1.199 ^{abc}	1.066 ^{abcde}	0.991 ^{abc}	7.690 ^{cdef}
ABA1EBL3	1.201 ^{abc}	0.984 ^e	1.009 ^{abc}	8.691 ^b
ABA2EBL0	1.136 ^{abcd}	1.114 ^{abcd}	1.025 ^{ab}	8.315 ^{bc}
ABA2EBL1	1.209 ^{ab}	0.964 ^e	0.993 ^{abc}	10.236 ^a
ABA2EBL2	1.009 ^d	1.063 ^{abcde}	1.016 ^{abc}	7.177 ^{efgh}
ABA2EBL3	1.071 ^{cd}	1.116 ^{abc}	0.976 ^{abcd}	8.025 ^{bcd}
ABA3EBL0	1.224 ^a	1.162 ^a	1.032 ^{ab}	8.185 ^{bcd}
ABA3EBL1	1.160 ^{abc}	1.048 ^{abcde}	0.856 ^e	6.705 ^{ghi}
ABA3EBL2	1.163 ^{abc}	1.030 ^{cde}	0.871 ^{de}	7.818 ^{cdef}
ABA3EBL3	1.190 ^{abc}	1.058 ^{abcde}	0.931 ^{bcd} ^e	7.418 ^{defg}
DMSH _{0.05}	0.132	0.118	0.104	0.847

ABA: Ácido abscísico y EBL: 24-epibrasinólida. ABA0: 0 mg L⁻¹; ABA1: 60 mg L⁻¹; ABA2: 100 mg L⁻¹; ABA3: 140 mg L⁻¹; EBL0: 0 mg L⁻¹; EBL1: 0.0024 mg L⁻¹; EBL2: 0.0048 mg L⁻¹; EBL3: 0.0096 mg L⁻¹; 1: Primera evaluación; 2: Segunda evaluación y 3: Tercera evaluación. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Tabla 4. Concentración de azufre en frutos (119, 126 y 133 ddt) y hojas (133 ddt) de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tratadas con reguladores de crecimiento.

Combinación	Azufre (g kg ⁻¹ biomasa seca)			
	Racimo 5 ¹	Racimo 6 ²	Racimo 7 ³	Hoja
ABA0EBL0	1.537 ^d	1.797 ^{bcd}	1.983 ^a	8.471 ^{cd}
ABA0EBL1	2.037 ^{ab}	1.866 ^{abcd}	1.843 ^{abcd}	7.081 ^e
ABA0EBL2	2.139 ^a	1.910 ^{abc}	1.770 ^{abcd}	8.516 ^d
ABA0EBL3	1.983 ^{abc}	1.854 ^{abcd}	1.671 ^{de}	8.202 ^{de}
ABA1EBL0	2.117 ^a	1.929 ^{abc}	1.813 ^{abcd}	8.450 ^d
ABA1EBL1	1.931 ^{bc}	2.066 ^a	1.805 ^{abcd}	9.772 ^{bc}
ABA1EBL2	2.011 ^{ab}	1.887 ^{abcd}	1.825 ^{abcd}	8.900 ^{cd}
ABA1EBL3	2.096 ^{ab}	1.742 ^{cd}	1.773 ^{abcd}	8.935 ^{cd}
ABA2EBL0	2.114 ^{ab}	1.950 ^{abc}	1.957 ^{ab}	9.258 ^{bcd}
ABA2EBL1	2.080 ^{ab}	1.679 ^d	1.715 ^{bcd}	11.164 ^a
ABA2EBL2	2.010 ^{abc}	2.088 ^a	1.943 ^{abc}	8.400 ^{de}
ABA2EBL3	1.831 ^c	2.025 ^a	1.820 ^{abcd}	10.340 ^{ab}
ABA3EBL0	2.028 ^{ab}	2.029 ^a	1.821 ^{abcd}	9.479 ^{bcd}
ABA3EBL1	2.151 ^a	1.981 ^{abc}	1.695 ^{cde}	8.579 ^d
ABA3EBL2	2.049 ^{ab}	2.002 ^{ab}	1.581 ^e	9.475 ^{bcd}
ABA3EBL3	2.127 ^a	1.944 ^{abc}	1.646 ^{de}	8.315 ^{de}
DMSH _{0.05}	0.214	0.223	0.256	1.322

ABA: Ácido abscísico y EBL: 24-epibrasinólida. ABA0: 0 mg L⁻¹; ABA1: 60 mg L⁻¹; ABA2: 100 mg L⁻¹; ABA3: 140 mg L⁻¹; EBL0: 0 mg L⁻¹; EBL1: 0.0024 mg L⁻¹; EBL2: 0.0048 mg L⁻¹; EBL3: 0.0096 mg L⁻¹; 1: Primera evaluación; 2: Segunda evaluación y 3: Tercera evaluación. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

En los frutos del racimo 5, la concentración de Mg en el testigo fue significativamente menor que en el tratamiento ABA1EBL0, con una reducción del 31.51%. En el racimo 6, el testigo presentó una concentración 15.32% menor en comparación con el tratamiento ABA3EBL0 (Tabla 3). En la tercera evaluación del fruto (racimo 7), el testigo mostró la mayor concentración de Mg. Las dosis medias y altas de EBL (EBL2 y EBL3), ya sean solas o combinadas con el nivel alto de ABA (ABA3), resultaron en la menor acumulación de Mg en fruto. En relación con la concentración de Mg en hoja (Tabla 3), el tratamiento ABA2EBL1 mostró la mejor respuesta y tuvo diferencias con el resto de los tratamientos.

El testigo mostró la concentración más baja de S en la primera evaluación de fruto (Tabla 4) y, fue significativamente diferente a todos los tratamientos. En la segunda evaluación (racimo 6), los frutos de los tratamientos ABA1EBL1, ABA2EBL2, ABA2EBL3 y ABA3EBL0 presentaron la mayor concentración de S, con incrementos de 14.9, 16.2, 12.7 y 12.9%, respectivamente, en comparación con el testigo. Mientras que, en la tercera evaluación (racimo 7) el testigo mostró la mejor respuesta. En relación a la concentración de S en hoja, el tratamiento ABA2EBL1 ocasionó la mejor respuesta y tuvo diferencias con la mayoría de los tratamientos excepto con ABA2EBL3. De manera contrastante, el tratamiento ABA2EBL1, que fue óptimo para hoja, se ubicó entre los cinco tratamientos con menor concentración de S en frutos del racimo 7.

Concentración de B y Mn en hojas y frutos de tomate

La presencia de B y Mn es fundamental en la nutrición vegetal. Resulta de suma importancia estudiar su concentración en hojas y frutos de tomate con bajo suministro de Ca tras la aplicación exógena de reguladores de crecimiento (Tablas 5 y 6).

Tabla 5. Concentración de boro en frutos (119, 126 y 133 ddt) y hojas (133 ddt) de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tratadas con reguladores de crecimiento.

Combinación	Boro (mg kg ⁻¹ biomasa seca)			
	Racimo 5 ¹	Racimo 6 ²	Racimo 7 ³	Hoja
ABA0EBL0	18.30 ^{cd}	18.69 ^{bc}	22.41 ^a	59.99 ^{bc}
ABA0EBL1	23.35 ^a	20.20 ^{abc}	17.76 ^{bcd}	49.69 ^c
ABA0EBL2	21.22 ^{abc}	20.21 ^{abc}	18.63 ^{bcd}	59.04 ^{bc}
ABA0EBL3	21.40 ^{ab}	19.39 ^{abc}	17.60 ^{bcd}	62.04 ^b
ABA1EBL0	22.43 ^{ab}	19.71 ^{abc}	18.58 ^{bcd}	60.86 ^b
ABA1EBL1	20.56 ^{abcd}	21.78 ^{ab}	18.32 ^{bcd}	64.37 ^b
ABA1EBL2	22.22 ^{ab}	21.77 ^{ab}	19.26 ^{bc}	57.37 ^{bc}
ABA1EBL3	21.11 ^{abc}	19.98 ^{abc}	19.54 ^{abc}	61.75 ^b
ABA2EBL0	21.22 ^{abc}	19.85 ^{abc}	20.06 ^{ab}	64.15 ^b
ABA2EBL1	19.96 ^{bcd}	17.74 ^c	17.69 ^{bcd}	75.71 ^a
ABA2EBL2	18.29 ^{cd}	20.79 ^{abc}	18.69 ^{bcd}	57.89 ^{bc}
ABA2EBL3	17.68 ^d	19.59 ^{abc}	18.07 ^{bcd}	63.40 ^b
ABA3EBL0	21.24 ^{abc}	22.18 ^a	18.84 ^{bcd}	56.80 ^{bc}
ABA3EBL1	22.13 ^{ab}	21.18 ^{abc}	16.76 ^{cd}	58.40 ^{bc}
ABA3EBL2	20.57 ^{abcd}	19.97 ^{abc}	16.22 ^d	66.50 ^{ab}
ABA3EBL3	20.46 ^{abcd}	21.67 ^{ab}	16.85 ^{cd}	56.24 ^{bc}
DMSH _{0.05}	3.53	3.32	2.93	10.56

ABA: Ácido abscísico y EBL: 24-epibrasinólida. ABA0: 0 mg L⁻¹; ABA1: 60 mg L⁻¹; ABA2: 100 mg L⁻¹; ABA3: 140 mg L⁻¹; EBL0: 0 mg L⁻¹; EBL1: 0.0024 mg L⁻¹; EBL2: 0.0048 mg L⁻¹; EBL3: 0.0096 mg L⁻¹; 1: Primera evaluación; 2: Segunda evaluación y 3: Tercera evaluación. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

En las dos primeras evaluaciones, algunos tratamientos con ABA y/o EBL, mostraron diferencias respecto al testigo (Tabla 5). En la primera evaluación, el tratamiento ABA0EBL1 presentó la mejor concentración de B y tuvo diferencias con los tratamientos ABA2EBL1, ABA2EBL2 y ABA2EBL3. Para la evaluación 2, el tratamiento ABA3EBL0 mostró la mayor respuesta y presentó diferencias con el tratamiento ABA2EBL1, siendo este último, el de menor concentración del elemento. Destaca que, en la tercera evaluación, el testigo (ABA0EBL0) mostró la mayor concentración de B; además, en este tratamiento la concentración de B aumentó progresivamente a lo largo de las evaluaciones. Respecto a la concentración de B en hoja, el tratamiento ABA2EBL1 mostró la mejor respuesta y presentó diferencias significativas con todos los tratamientos excepto con ABA3EBL2.

En la primera evaluación (Tabla 6) el tratamiento ABA3EBL0 presentó la mayor concentración de Mn y tuvo diferencias con el testigo y con ABA0EBL1, ABA0EBL2, ABA0EBL3, ABA1EBL0, ABA1EBL1 y ABA2EBL2. En la segunda evaluación el tratamiento ABA2EBL0 tuvo la mejor respuesta, presentó diferencias con el testigo, pero no mostró diferencias con el tratamiento ABA3EBL0. En la tercera evaluación nuevamente el tratamiento ABA2EBL0 mostró la mayor concentración de Mn, pero no presentó diferencias con el testigo. Los tratamientos ABA2EBL0 y

ABA3EBL0 se ubicaron de manera recurrente entre los de mayor concentración de Mn en las evaluaciones en fruto. La ausencia de ABA en las combinaciones resultó en la menor acumulación de Mn en forma consistente en las tres evaluaciones. Para la concentración de Mn en hoja, el tratamiento ABA2EBL0, presentó la mejor respuesta y tuvo diferencias con el resto de los tratamientos. La menor concentración del elemento lo mostró el tratamiento ABA0EBL3.

Tabla 6. Concentración de manganeso en frutos (119, 126 y 133 ddt) y hojas (133 ddt) de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tratadas con reguladores de crecimiento.

Combinación	Manganeso (mg kg ⁻¹ biomasa seca)			
	Racimo 5 ¹	Racimo 6 ²	Racimo 7 ³	Hoja
ABA0EBL0	5.98 ^g	9.08 ^{efg}	9.50 ^{abc}	55.83 ^{ef}
ABA0EBL1	8.74 ^f	9.69 ^{bcdefg}	9.20 ^{abcd}	61.88 ^{de}
ABA0EBL2	8.68 ^f	8.47 ^g	8.28 ^{cd}	54.67 ^{ef}
ABA0EBL3	8.86 ^{ef}	8.59 ^{fg}	8.02 ^d	48.23 ^f
ABA1EBL0	10.30 ^{bcdef}	9.63 ^{bcdefg}	8.88 ^{bcd}	64.12 ^{de}
ABA1EBL1	9.22 ^{def}	10.54 ^{abcd}	9.67 ^{ab}	82.43 ^c
ABA1EBL2	11.38 ^{ab}	10.98 ^{ab}	9.08 ^{abcd}	83.18 ^c
ABA1EBL3	11.45 ^{ab}	9.98 ^{bcde}	9.06 ^{bcd}	101.55 ^b
ABA2EBL0	10.78 ^{abcd}	11.63 ^a	10.38 ^a	124.29 ^a
ABA2EBL1	11.27 ^{abc}	9.88 ^{bcdef}	9.33 ^{abc}	103.26 ^b
ABA2EBL2	9.72 ^{cdef}	9.34 ^{defg}	8.91 ^{bcd}	65.96 ^{de}
ABA2EBL3	10.53 ^{abcd}	9.84 ^{bcdef}	8.83 ^{bcd}	59.78 ^{def}
ABA3EBL0	12.14 ^a	10.75 ^{abc}	9.47 ^{abc}	100.02 ^b
ABA3EBL1	10.46 ^{abcde}	10.32 ^{abcde}	8.57 ^{bcd}	59.11 ^{def}
ABA3EBL2	10.53 ^{abcd}	9.57 ^{cdefg}	8.21 ^{cd}	64.48 ^{de}
ABA3EBL3	10.71 ^{abcd}	9.96 ^{bcde}	9.49 ^{abc}	71.18 ^{cd}
DMSH _{0.05}	1.65	1.33	1.31	12.45

ABA: Ácido abscísico y EBL: 24-epibrasinólida. ABA0: 0 mg L⁻¹; ABA1: 60 mg L⁻¹; ABA2: 100 mg L⁻¹; ABA3: 140 mg L⁻¹; EBL0: 0 mg L⁻¹; EBL1: 0.0024 mg L⁻¹; EBL2: 0.0048 mg L⁻¹; EBL3: 0.0096 mg L⁻¹; 1: Primera evaluación; 2: Segunda evaluación y 3: Tercera evaluación. Valores con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

DISCUSIÓN

Concentración de N, P y K en frutos y hojas de tomate

Los resultados muestran que ningún tratamiento superó al testigo en la concentración de N en fruto; por lo que, la aplicación de reguladores de crecimiento (ABA y EBL), solos o combinados, en plantas de tomate con bajo suministro de calcio (45 mg L⁻¹) no modificó esta variable. En contraste, la concentración foliar de N fue influenciada por el tratamiento ABA2EBL1. Estudios previos sobre la aplicación de reguladores de crecimiento muestran resultados variables, dependientes de la dosis y de la vía de aplicación. En este sentido, Barickman *et al.* (2019) evaluaron el efecto de las aplicaciones de ABA en la concentración de nutrientes en frutos y hojas de tomate, observaron que aplicaciones foliares con dosis altas de ABA (500 mg L⁻¹) no aumentaron la concentración de P y K respecto al testigo. Por el contrario, la aplicación de ABA a la raíz en una dosis menor (50 mg L⁻¹) ocasionó un aumento de P en fruto y de P y K en hoja. Este resultado coincide parcialmente con

los hallazgos del presente estudio, debido a que la aplicación solamente de ABA (60, 100 y 160 mg L⁻¹) aumentó significativamente la concentración de P en frutos de los racimos 5 y 6 y en la hoja.

Por su parte, Riboldi *et al.* (2019) reportaron que la aplicación EBL (0.01 µM) en plantas de tomate sin suministro de calcio incrementó la concentración de K soluble en fruto respecto al testigo, lo que sugiere un papel del EBL en el movimiento del K (Nazir *et al.*, 2019). De manera similar, Soyomez *et al.* (2017) mencionan que la aplicación de EBL (0.5 y 1 µM) aumentó la concentración de K en hojas de tomate expuesto a estrés por salinidad. Asimismo, Shah *et al.* (2023) indicaron que la aplicación de EBL en plantas de mostaza (*Brassica juncea* L.) incrementó la concentración de K en tres cultivares evaluados en 11.8, 15.7 y 13.4%, respectivamente. En el presente estudio, el efecto combinado y benéfico de los reguladores de crecimiento ABA y EBL en la concentración de K se apreció en la segunda y tercera evaluación de fruto y en la evaluación en hoja.

Concentración de Mg y S en frutos y hojas de tomate

Respecto a la concentración de Mg en fruto, los resultados sugieren que la aplicación de ABA en ausencia de EBL en etapas tempranas del desarrollo de la planta se asocia con mayores concentraciones de Mg en el fruto en condiciones de bajo suministro de Ca. Resultados similares reportaron Barickman *et al.* (2019) quienes observaron que la aplicación de ABA a la raíz (50 mg L⁻¹), aunque sin alcanzar significancia estadística, tendió a aumentar la concentración de Mg en el fruto. En la primera evaluación, plantas que fueron tratadas con los reguladores de crecimiento, tuvieron frutos con mayor concentración de Mg, en comparación con el testigo (ABA0EBL0). Esto concuerda con lo reportado por Zhang *et al.* (2023) quienes indicaron una disminución en la concentración de Mg en frutos de tomate del 59.79% tras la exposición a estrés abiótico.

Las menores concentraciones de Mg observadas en los tratamientos con dosis elevadas de ABA y EBL podrían estar relacionadas con efectos fisiológicos asociados a reguladores de crecimiento, particularmente en procesos como la transpiración y la conductancia estomática. Riboldi *et al.* (2018) mencionan que la aplicación foliar de EBL en tomate disminuye la tasa de transpiración. Por su parte, De-Freitas *et al.* (2014) indican que la aplicación exógena de ABA en plantas, reduce la conductancia estomática. Mientras que, López-Ruíz *et al.* (2020) señalan que el ABA y los BR regulan la estabilidad de los estomas abiertos y juegan un papel fundamental en el cierre estomático.

Los valores de concentración foliar de Mg obtenidos en esta investigación, se encuentran en concordancia con reportes previos en tomate. Por ejemplo, Barickman *et al.* (2019) reportaron una concentración de 11.280 g kg⁻¹ de Mg en plantas de tomate tratadas exógenamente con ABA (500 mg L⁻¹); mientras que, en plantas no tratadas con ABA y cultivadas con restricción de calcio (90 mg L⁻¹) reportaron una menor concentración (11.090 g Mg kg⁻¹). Por otra parte, Riboldi *et al.* (2019) encontraron que la aplicación foliar de EBL (0.01 µM) en plantas de tomate sin suministro de Ca, incrementó la concentración de Mg en hojas (5.800 g kg⁻¹). La concentración de Mg en el presente estudio fue de 10.236 g kg⁻¹ superior a lo reportado por Riboldi *et al.* (2019). Esta diferencia se puede atribuir a la acción combinada y sinérgica de los dos reguladores de crecimiento, bajo las condiciones específicas evaluadas, lo cual podría haber estimulado la absorción y transporte de Mg.

La evidencia obtenida a través de las tres evaluaciones de fruto y la evaluación foliar indica que el uso de EBL, en combinación con distintos niveles de ABA, se relaciona con mayores concentraciones de S en los tejidos evaluados. De manera similar, Maia *et al.* (2023) indicaron que la aplicación exógena de EBL mitigó el estrés generado por el exceso de níquel en plantas de tomate, incrementando la concentración de S en raíz, tallo y hoja en 41.48, 5.40 y 10.36%, respectivamente. Estos resultados reafirman el papel determinante de los reguladores de crecimiento en la atenuación de estreses abióticos, incluidos aquellos asociados con deficiencias nutrimentales. En este sentido Sánchez-Aguilar *et al.* (2025) demostraron que la aplicación conjunta de ABA y EBL es una intervención eficaz para revertir los efectos del bajo suministro de Ca (45 mg L^{-1}) en tomate.

Concentración de B y Mn en hojas y frutos de tomate

En el caso del B, los resultados de la primera y segunda evaluación del fruto indican que la aplicación individual de ABA o EBL se relaciona con mayores concentraciones de este elemento en comparación con algunos tratamientos combinados, lo que sugiere que el uso de estas fitohormonas puede ser suficiente para inducir respuestas favorables en la concentración de B en frutos bajo condiciones de deficiencia de calcio. Los resultados de Dos-Santos *et al.* (2023) concuerdan parcialmente con los aquí presentados, quienes reportaron que la aplicación exógena de EBL ($100 \mu\text{M}$) incrementó 23.93% la concentración de B en hojas de soya (*Glycine max* L.), misma que fue estadísticamente superior a la concentración de B registrada en hojas de plantas testigo. En contraste, Barickman *et al.* (2019) indicaron que la aplicación de ABA, tanto de manera foliar (500 mg L^{-1}), radical (50 mg L^{-1}) o combinada, redujo la concentración de B en frutos de tomate en comparación con el testigo. Estas diferencias destacan la complejidad de la interacción entre los reguladores de crecimiento y la nutrición mineral, y sugieren que las respuestas a estas fitohormonas dependen de la especie, el órgano, la etapa de desarrollo, la dosis, la vía de aplicación y las condiciones de estrés abiótico.

En el estudio realizado por Choi *et al.* (2015) indicaron la concentración de B en diferentes tejidos de la planta de tomate con y sin suministro del elemento, reportaron concentraciones: de 24.7, 54.3 y $27.8 \mu\text{g g}^{-1}$ para pecíolo de la hoja, hoja y racimo del fruto, respectivamente, bajo suministro adecuado de B, y valores de 8.20, 4.11 y $5.5 \mu\text{g g}^{-1}$, respectivamente, en ausencia del elemento. Por su parte, en este estudio, la concentración de B en frutos de los racimos 5, 6 y 7 se ubicó en el rango de 23.35 a $16.22 \mu\text{g g}^{-1}$, inferior al reportado por Choi *et al.* (2015) bajo suministro adecuado de B ($27.8 \mu\text{g g}^{-1}$), pero superior al reportado cuando hubo ausencia del elemento ($5.5 \mu\text{g g}^{-1}$), lo que muestra la participación de los reguladores de crecimiento en el movimiento de B.

El transporte de B dentro de la planta está estrechamente relacionado con la corriente transpiratoria, particularmente en especies como el tomate, en las que la sacarosa es el principal carbohidrato transportado, lo que limita el movimiento de B en el xilema (Brown y Shelp, 1997). Lo anterior explica la disminución de la concentración de B en la mayoría de los tratamientos a través de las evaluaciones; conforme aumentaron las aplicaciones de los reguladores de crecimiento, el transporte de B fue limitado y esto se reflejó en la concentración del elemento en la tercera evaluación. La mayor concentración de B observada en el testigo en la tercera evaluación puede atribuirse a la ausencia de ABA y EBL, que mantuvo una mayor tasa transpiratoria.

Los resultados obtenidos en Mn concuerdan con los reportados por Barickman *et al.* (2019) quienes mencionan que la aplicación de 50 mg L⁻¹ de ABA a la raíz de tomate provocó un incremento en la concentración de Mn en hoja de 2.7% y en fruto de 14.44%, este último, con diferencias con el testigo. Por otro lado, la aplicación foliar de una dosis más alta de ABA (500 mg L⁻¹) resultó en una menor concentración de Mn en hoja, pero demostró un efecto significativo en fruto, con un incremento del 17.77% respecto al testigo. La aplicación aislada de EBL mostró un efecto limitado en la concentración de Mn en frutos y hojas de tomate, con excepción de los frutos del racimo 5. La mayor acumulación de Mn se obtuvo consistentemente con la aplicación de los niveles 2 y 3 de ABA. Esto sugiere que, en plantas expuestas a un bajo suministro de Ca, el ABA podría desempeñar un rol relevante en la regulación de la concentración de Mn en tomate.

CONCLUSIONES

Los reguladores de crecimiento (ABA y EBL), ya sea aplicados individualmente o en combinación, mostraron efectos diferenciales en la concentración de fósforo, magnesio, azufre, boro y manganeso en frutos de tomate en las dos primeras evaluaciones (racimos 5 y 6) de plantas con bajo suministro de calcio. Estos resultados sugieren que la aplicación de estas fitohormonas puede contribuir a modificar las concentraciones de ciertos nutrimentos en la fase de producción intermedia de la planta. En las dos primeras evaluaciones, la concentración de nutrimentos con excepción de azufre y potasio fue mayor cuando se manejaron los reguladores de crecimiento de manera separada. De manera general, los tratamientos que mejor resultado expresaron fueron ABA1EBL0, ABA2EBL0, ABA3EBL0 y ABA0EBL1. No obstante, en etapas más avanzadas (racimo 7), su efecto en la concentración de nutrimentos en fruto fue menos consistente. En hoja, la aplicación de estas fitohormonas resulta efectiva para incrementar la concentración de nutrientes. La participación del ABA es indispensable para favorecer la concentración foliar de todos los nutrimentos evaluados. Para algunos nutrimentos, la aplicación solo de ABA (ABA2EBL0) mostró los mejores resultados, para otros más, la mejor respuesta se obtuvo al combinar ambos reguladores de crecimiento (ABA2EBL1).

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Ahmad P, Ahanger MA, Egamberdieva D, Alam P, Alyemeni MN, Ashraf M (2018) Modification of osmolytes and antioxidant enzymes by 24-epibrassinolide in chickpea seedlings under mercury (Hg) toxicity. *Journal of Plant Growth Regulation* 37(1): 309-322. <https://doi.org/10.1007/s00344-017-9730-6>
- Ahmed M, Babayola M, Bake ID (2024) Role of horticultural crops in food and nutritional security: A review. *Journal of Nutrition and Food Processing* 7(8): 01-06. <https://doi.org/10.31579/2637-8914/226>

- Alcántar GG, Sandoval VM (1999) Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial No. 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, Edo. de México. 156p.
- Ali MM, Anwar R, Malik AU, Khan AS, Ahmad S, Hussain Z, Hasan MU, Nasir M, Chen F (2022) Plant growth and fruit quality response of strawberry is improved after exogenous application of 24-epibrassinolide. *Journal of Plant Growth Regulation* 41(4): 1786-1799. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10422-2>
- Barickman TC, Kopsell DA, Sams CE (2019) Applications of abscisic acid and increasing concentrations of calcium affect the partitioning of mineral nutrients between tomato leaf and fruit tissue. *Horticulturae* 5(3): 49. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5030049>
- Brown PH, Shelp BJ (1997) Boron mobility in plants. *Plant and Soil* 193: 85-101. <https://doi.org/10.1023/A:1004211925160>
- Bukhari SAH, Wang R, Wang W, Ahmed IM, Zheng W, Cao F (2016) Genotype-dependent effect of exogenous 24-epibrassinolide on chromium-induced changes in ultrastructure and physicochemical traits in tobacco seedlings. *Environmental Science and Pollution Research* 23(18): 18229-18238. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7017-2>
- Bulgakov VP, Koren OG (2022) Basic protein modules combining abscisic acid and light signaling in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science* 12: 808960. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.808960>
- Choi EY, Park HI, Ju JH, Yoon YH (2015) Boron availability alters its distribution in plant parts of tomato. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 56(2): 145-151. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-0044-y>
- De-Freitas ST, McElrone AJ, Shackel KA, Mitcham EJ (2014) Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. *Journal of Experimental Botany* 65(1): 235-247. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert364>
- Díaz-Pérez JC, Hook JE (2017) Plastic-mulched bell pepper (*Capsicum annuum* L.) plant growth and fruit yield and quality as influenced by irrigation rate and calcium fertilization. *HortScience* 52: 774-781. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11830-17>
- Dos-Santos LA, Batista BL, Lobato AKDS (2023) 24-Epibrassinolide delays chlorophyll degradation and stimulates the photosynthetic machinery in magnesium-stressed soybean plants. *Journal of Plant Growth Regulation* 42(1): 183-198. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10539-4>
- FAO (2024) Agricultural Production Statistics 2010–2023. FAOSTAT Analytical Briefs, No. 96. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/df90e6cf-4178-4361-97d4-5154a9213877/content>. Fecha de consulta: 20 de enero de 2026.
- FAOSTAT (2023) Cultivos y productos de ganadería 2023. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. Fecha de consulta: 15 de octubre de 2025.
- Gao H, Wu X, Zorrilla C, Vega SE, Palta JP (2020) Fractionating of calcium in tuber and leaf tissues explains the calcium deficiency symptoms in potato plant overexpressing *CAX1*. *Frontiers in Plant Science* 10: 1793. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01793>
- Kabir MY, Díaz-Pérez JC (2025) Calcium route in the plant and blossom-end rot incidence. *Horticulturae* 11(7): 807. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11070807>
- Khatri P, Kumar P, Shakya KS, Kirlas MC, Tiwari KK (2024) Understanding the intertwined nature of rising multiple risks in modern agriculture and food system. *Environment, Development and Sustainability* 26(9): 24107-24150. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03638-7>
- López-Ruiz BA, Zluhan-Martínez E, Sánchez MDLP, Álvarez-Buylla ER, Garay-Arroyo A (2020) Interplay between hormones and several abiotic stress conditions on *Arabidopsis thaliana* primary root development. *Cells* 9(12): 2576. <https://doi.org/10.3390/cells9122576>
- Maia CF, Pereira YC, Da Silva BRS, Batista BL, Lobato AKDS (2023) Exogenously applied 24-epibrassinolide favours stomatal performance, ROS detoxification and nutritional balance, alleviating oxidative

- damage against the photosynthetic apparatus in tomato leaves under nickel stress. *Journal of Plant Growth Regulation* 42(4): 2196-2211. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10693-3>
- Mishra A (2021) Physiological disorders of tomato-an overview. *International Journal of Farm Sciences* 11(4): 46-50. <https://doi.org/10.5958/2250-0499.2021.00054.9>
- Nazir F, Hussain A, Fariduddin Q (2019) Interactive role of epibrassinolide and hydrogen peroxide in regulating stomatal physiology, root morphology, photosynthetic and growth traits in *Solanum lycopersicum* L. under nickel stress. *Environmental and Experimental Botany* 162: 479-495. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.021>
- R Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 1 de octubre de 2025.
- Riboldi LB, Gaziola SA, Azevedo RA, De-Freitas ST, De-Camargo e Castro PR (2019) 24-Epibrassinolide mechanisms regulating blossom-end rot development in tomato fruit. *Journal of Plant Growth Regulation* 38(3): 812-823. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9892-x>
- Riboldi LB, Da-Cruz-Araújo SH, Murcia JAG, De-Freitas ST, De-Camargo-e-Castro PR (2018) Abscisic acid and 24-epibrassinolide regulate blossom-end rot (BER) development in tomato fruit under Ca²⁺ deficiency. *Australian Journal of Crop Science* 12(9): 1440-1446. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.09.PNE1106>
- Sánchez-Aguilar AB, Sandoval-Villa M, Trejo-Téllez LI, Suárez-Espinosa J, Fernández-Pavía YL (2025) Blossom-end rot control in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit using plant growth regulators. *Agrociencia* 59(6): 1-17. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v59i6.3331>
- Seleiman MF, Kheir AM (2018) Maize productivity, heavy metals uptake and their availability in contaminated clay and sandy alkaline soils as affected by inorganic and organic amendments. *Chemosphere* 204: 514-522. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.073>
- Shah SH, Islam S, Alamri S, Parrey ZA, Mohammad F, Kalaji HM (2023). Plant growth regulators mediated changes in the growth, photosynthesis, nutrient acquisition and productivity of mustard. *Agriculture* 13(3): 570. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030570>
- Shahzad B, Tanveer M, Che Z, Rehman A, Cheema SA, Sharma A, Song H, Rehman S, Zhaorong D (2018) Role of 24-epibrassinolide (EBL) in mediating heavy metal and pesticide induced oxidative stress in plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 147: 935-944. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.066>
- SIAP (2022) Cierre agrícola. Gobierno de México. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/732608/Jitomate_Mayo.pdf/. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2025.
- Soylemez S, Kaya C, Dikilitas SK (2017) Promotive effects of epibrassinolide on plant growth, fruit yield, antioxidant, and mineral nutrition of saline stressed tomato plants. *Pakistan Journal of Botany* 49(5): 1655-1661.
- Steiner AA (1984) The Universal Nutrient Solution, Proceedings of IWOSC 1984 6th International Congress on Soilless Culture. Wageningen. The Netherlands. pp. 633-650.
- Topcu Y, Nambeesan SU, Van Der Knaap E (2022) Blossom-end rot: a century-old problem in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and other vegetables. *Molecular Horticulture* 2(1): 1. <https://doi.org/10.1186/s43897-021-00022-9>
- Zhang Y, Liang Y, Han J, Hu X, Li X, Zhao H, Bai L, Shi Y, Ahammed GJ (2023) Interactive effects of iron and photoperiods on tomato plant growth and fruit quality. *Journal of Plant Growth Regulation* 42(1): 376-389. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10554-5>