



Optimización de la propagación clonal de aguacate mediante la aplicación de bioestimulantes a plantas donadoras de vareta

Mercedes Martínez-Villagómez¹ (<https://orcid.org/0000-0003-1132-2630>)

Alejandro Facundo Barrientos-Priego^{1*} (<https://orcid.org/0000-0001-6555-7633>)

José Oscar Mascorro-Gallardo¹ (<https://orcid.org/0000-0001-9713-4758>)

Gabriel Iturriaga² (<https://orcid.org/0000-0002-2535-0184>)

María de la Cruz Espíndola-Barquera³ (<https://orcid.org/0000-0003-0247-6267>)

¹Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

²Tecnológico Nacional de México. Carretera Celaya-Juventino Rosas km 8, Roque, Celaya, C. P. 38110, México.

³Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S. C. Ignacio Zaragoza 6, col. Centro, Coatepec Harinas, Estado de México, C. P. 51700, México.

*Autor para correspondencia: abarrientosp@chapingo.mx

Resumen

La propagación clonal de portainjertos de aguacate (*Persea americana* Mill.) garantiza uniformidad genética y tolerancia a estreses bióticos y abióticos; sin embargo, su eficiencia



suele limitarse por una baja capacidad de enraizamiento. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres bioestimulantes (L-aminoácidos, extractos de algas marinas y *Trichoderma harzianum*) aplicados a plantas donadoras sobre la productividad de varetas y la capacidad de enraizamiento de brotes etiolados en cuatro portainjertos ('Duke 7', 'Zutano', 'Day' y 'Velvick'). El portainjerto fue el factor con mayor influencia en las variables evaluadas. 'Duke 7' mostró el mayor rendimiento de varetas y porcentaje de enraizamiento (100 %), seguido por 'Zutano' (95.8 %), mientras que 'Velvick' presentó la respuesta más baja (31.2 %). Entre los bioestimulantes, los L-aminoácidos incrementaron significativamente el número de varetas, yemas e injertos por planta donadora. Durante el enraizamiento, los bioestimulantes mejoraron la calidad y cantidad de raíces en 'Duke 7', aunque sus efectos no fueron consistentes en los otros portainjertos. La bioestimulación de plantas donadoras de vareta optimiza la propagación clonal, principalmente en portainjertos con alta capacidad de enraizamiento intrínseca, como 'Duke 7'. En portainjertos de baja respuesta ('Day' y 'Velvick'), se deben establecer protocolos específicos de enraizamiento.

Palabras clave: portainjertos clonales, enraizamiento adventicio, L-aminoácidos, *Trichoderma harzianum*, extractos de algas marinas.

Recibido: 19/03/2025

Aceptado: 25/02/2026

Introducción

La propagación clonal de portainjertos de aguacate (*Persea americana* Mill.) constituye una estrategia clave para la agricultura moderna, ya que garantiza la uniformidad genética en plantaciones comerciales (Ben-Ya'acov & Zilberstaine, 1999a; Mickelbart et al., 2007). Esta homogeneidad favorece el manejo agronómico y la estabilidad de la producción. Además, el



uso de portainjertos clonales representa la principal herramienta para mitigar diversos factores que limitan la producción. Entre estos destacan la susceptibilidad a patógenos del suelo, como *Phytophthora cinnamomi* Rands (Menge et al., 2012; Wolstenholme, 2003), así como el estrés abiótico asociado con la acumulación de sales (Acosta-Rangel et al., 2019), la alcalinidad y la baja aireación del suelo (Ben-Ya'acov & Zilberstaine, 1999a). Asimismo, algunos portainjertos mejoran la eficiencia de absorción de nutrientes (Lazare et al., 2019) y, en consecuencia, incrementan el rendimiento y la calidad del fruto (Menzel & Le Lagadec, 2014).

No obstante, la propagación clonal a gran escala enfrenta un desafío técnico central: la baja y variable capacidad de enraizamiento adventicio de portainjertos seleccionados (Hiti-Bandaralage et al., 2022). Además, la eficiencia del proceso depende de la metodología empleada y de las condiciones ambientales (Ernst, 1999; Tripathi & Karunakaran, 2019). La etapa de enraizamiento constituye el punto crítico del proceso, incluso en el método más utilizado a nivel mundial: el acodo aéreo de brotes etiolados (Darrouy-Palacios et al., 2010). Para superar esta limitante, se han explorado diversas estrategias orientadas a estimular la formación de raíces adventicias (Estay et al., 2016), como la aplicación de auxinas (Li et al., 2024; Rogel-Castellanos et al., 2000) y la etiolación controlada (Gleeson et al., 2016).

Un aspecto poco explorado para mejorar el enraizamiento de los portainjertos es el manejo agronómico de las plantas donadoras de varetas. El estado fisiológico y nutrimental de la planta donadora influye de manera determinante en la calidad del material vegetativo y, por ende, en su potencial de enraizamiento (Santos et al., 2011). En este contexto, la bioestimulación de las plantas donadoras representa una estrategia complementaria prometedora. Los bioestimulantes inducen respuestas fisiológicas favorables, como el incremento del vigor vegetativo (Pacholczak & Nowakowska, 2020) y la modulación del equilibrio hormonal asociado con la rizogénesis (Kim et al., 2019).

Los compuestos y microorganismos bioestimulantes favorecen la síntesis de carbohidratos y metabolitos esenciales, los cuales proporcionan energía y activan señales metabólicas necesarias para la formación de raíces adventicias, así como para la acumulación de reservas en los tejidos de la varetas (Martínez-Lorente et al., 2024). Con base en este fundamento fisiológico y en la necesidad de optimizar la propagación clonal de portainjertos de aguacate,



se planteó la hipótesis de que la aplicación de bioestimulantes a plantas donadoras incrementa tanto la productividad del material de propagación (número de varetas e injertos) como la capacidad de enraizamiento de brotes etiolados. En consecuencia, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres bioestimulantes (L-aminoácidos, extractos de algas marinas y *Trichoderma harzianum*) aplicados a plantas donadoras sobre la productividad de varetas y la capacidad de enraizamiento de brotes etiolados en cuatro portainjertos de aguacate ('Duke 7', 'Zutano', 'Day' y 'Velvick').

Materiales y métodos

Ubicación del experimento y condiciones ambientales

El estudio se realizó entre 2021 y 2024 en un invernadero de la Universidad Autónoma Chapingo (19° 29' 25.56'' N y 98° 52' 24.57'' O, a 2 264 m s. n. m.). Previo a la aplicación de tratamientos (enero a junio de 2023), la temperatura media era de 18.0 °C y la humedad relativa promedio de 60.2 %. Durante la aplicación de los bioestimulantes (junio a diciembre de 2023), estos valores fueron de 18.0 °C y 75.2 %, respectivamente. En la etapa de enraizamiento de brotes etiolados (febrero a mayo de 2024), la temperatura media era de 20.7 °C y la humedad relativa de 44.4 % (Figura 1).

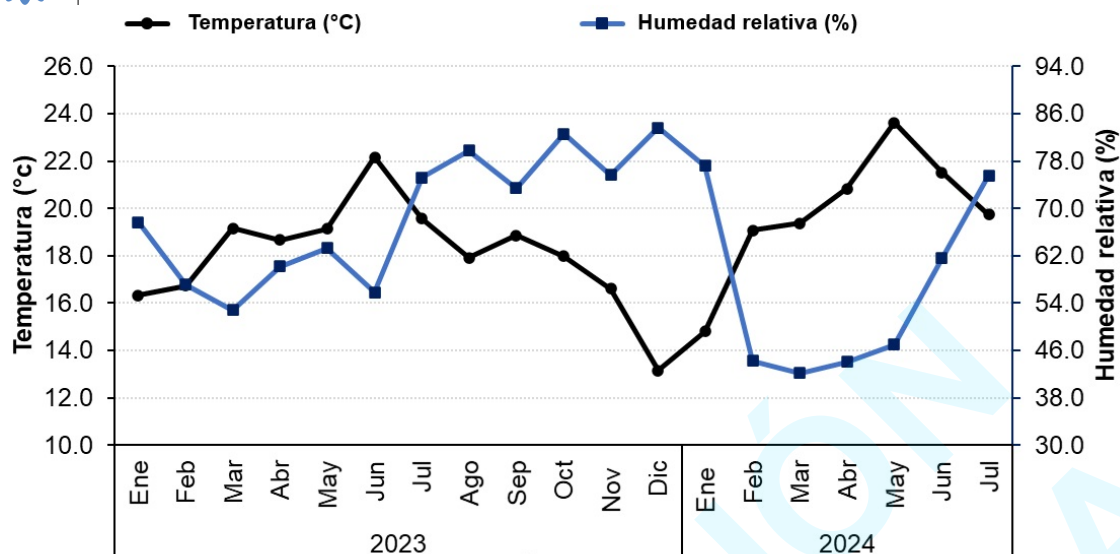


Figura 1. Fluctuación mensual de la temperatura media y la humedad relativa registradas en el invernadero durante el periodo experimental.

Establecimiento del material vegetal y aplicación de tratamientos

Para la producción de plantas donadoras de varetas se emplearon semillas de aguacate de raza antillana obtenidas en Veracruz, México. Las semillas se sembraron el 10 de agosto de 2021 en bolsas de polietileno de 1 L con una mezcla de arena de río y suelo agrícola (1:1, v/v). Cuando las plántulas alcanzaron un diámetro aproximado de 6 mm, se injertaron (26 de octubre de 2021) con varetas de los portainjertos ‘Duke 7’, ‘Zutano’, ‘Day’ y ‘Velvick’, provenientes del Banco de Germoplasma de Aguacate del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Desde la brotación de los injertos hasta alcanzar 80 cm de altura, las plantas donadoras recibieron riegos periódicos para mantener la humedad del sustrato, así como manejo fitosanitario mediante aplicaciones de lambdacialotrina ($0.04 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$) y benomilo ($1.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$).



El 19 de diciembre de 2022, las plantas se trasplantaron a macetas de policloruro de vinilo de 28 L (Air-Pot®) con un sustrato compuesto por roca volcánica, turba, perlita, corteza de pino compostada y suelo agrícola (2:1:1:1:1, v/v/v/v/v), con pH de 7.0 y conductividad eléctrica (CE) de 0.5 dS·m⁻¹. El manejo hídrico y nutrimental se realizó mediante fertirriego con solución nutritiva (Cuadro 1), ajustada a pH 6.0 y CE de 1.2 dS·m⁻¹.

Cuadro 1. Composición nutrimental de la solución nutritiva utilizada en el fertirriego de plantas donadoras de varetas de aguacate.

Macronutrientes (mg·L ⁻¹)						Micronutrientes (mg·L ⁻¹)					
NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
80	16	56	136	90	24	3.0	0.5	0.03	0.05	0.5	0.05

Después del trasplante, el manejo fitosanitario continuó con aplicaciones foliares alternadas de fungicida (oxicloruro de cobre, 2.5 g·L⁻¹) e insecticida (imidacloprid, 1.0 mL·L⁻¹). Las plantas crecieron durante seis meses (de diciembre de 2022 a mayo de 2023) antes de iniciar la aplicación de tratamientos de bioestimulación.

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4 × 4 (portainjerto [P] × bioestimulante [B]) y tres repeticiones. El factor P incluyó ‘Duke 7’, ‘Zutano’, ‘Day’ y ‘Velvick’, mientras que el factor B correspondió al testigo, L-aminoácidos, extracto de algas marinas y *T. harzianum*. La unidad experimental consistió en tres plantas donadoras de varetas.

Los bioestimulantes se aplicaron una vez por semana de junio a diciembre de 2023. Cada planta recibió 250 mL de solución en la base del tallo (Cuadro 2). Pevio a la preparación de las soluciones, el agua se acidificó a pH 5.8 con un regulador comercial (Dap-Plus®, 0.5 mL·L⁻¹). Los valores promedio de pH y CE por tratamiento fueron: testigo (5.8; 0.24 dS·m⁻¹), L-aminoácidos (6.3; 1.28 dS·m⁻¹), extracto de algas marinas (7.0; 1.43 dS·m⁻¹) y *T. harzianum* (5.8; 0.22 dS·m⁻¹).



Cuadro 2. Dosis y composición de los bioestimulantes aplicados a las plantas donadoras de varetas.

Bioestimulante	Composición y concentración (%)
Testigo	Agua de riego acidificada
L-aminoácidos (Amikrone®): 2.0 mL·L ⁻¹	Glicina (15.13), alanina (6.91), ácido glutámico (6.61), prolina (6.20), lisina (5.02), ácido aspártico (2.44), leucina (2.10), valina (1.77), fenilalanina (1.27), isoleucina (0.62), metionina (0.52), arginina (0.36), tirosina (0.31), serina (0.29), treonina (0.20), cisteína (0.20) e histidina (0.15).
Extracto de algas marinas (Algamar®): 3.0 g·L ⁻¹	<i>Ascophylum nodosum</i> , <i>Sargassum</i> , <i>Laminaria</i> , <i>Macrosistis pirifera</i> , <i>Egrecia menzies</i> (82.54), potasio (5.30), ácido algínico (5.0), azufre (3.5), nitrógeno (3.0), calcio (0.4), magnesio (0.15), fósforo (0.10), hierro (0.0025), boro (0.0030) y cobre (0.0002).
<i>T. harzianum</i> (Spectrum® Tricho-Bio) 3.0 mL·L ⁻¹	1.0×10^{11} esporas viables de <i>T. harzianum</i> (0.45).

Al concluir el periodo de aplicación de los bioestimulantes, se evaluaron las siguientes variables: número de varetas por planta donadora, número de yemas por varetas, número de injertos por varetas y número de injertos por planta donadora.

Propagación clonal y evaluación del enraizamiento de brotes etiolados

Entre el 5 y 12 de enero de 2024, se colectaron varetas de las plantas donadoras tratadas y se injertaron en plántulas nodrizas de aguacate antillano. Se injertaron 20 plantas por tratamiento de bioestimulación. La unidad experimental estuvo conformada por cinco plantas



con cuatro repeticiones. Para los injertos se emplearon secciones de vareta con dos yemas, cubiertas con bolsas de polietileno transparente de 5×8 cm. Las heridas de corte se sellaron con pegamento blanco.

A partir del 1 de febrero de 2024, tras la brotación de las yemas, las plantas se trasladaron a un cuarto de etiolación (25.8 °C y 64.5 % de humedad relativa), donde se mantuvieron en completa oscuridad hasta que los brotes alcanzaron entre 25 y 30 cm de longitud (Figura 2a). Posteriormente, cada brote se acodó; para ello, se realizó una herida de aproximadamente 2 cm en la base del brote y se aplicaron $50 \mu\text{L}$ de enraizador (Dip'N Grw®: $5\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de ácido indol-3-butírico + $2\,500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de ácido 1-naftalenacético). Cada brote se colocó en un contenedor de plástico transparente de 150 cm^3 con polvillo de coco húmedo como sustrato. Las plantas acodadas se mantuvieron en un área sombreada y se regaron periódicamente para mantener la humedad del sustrato del acodo y de la planta nodriza (Figura 2b). La evaluación del enraizamiento se efectuó 85 días después de la aplicación del enraizador (Figura 2c).



Figura 2. Etapas del proceso experimental de propagación clonal de aguacate a partir de plantas donadoras tratadas con bioestimulantes: a) brotes etiolados antes del acodo, b) brotes acodados durante el enraizamiento y c) brote enraizado.



Las variables evaluadas fueron: porcentaje de enraizamiento (número de brotes enraizados / número total de brotes \times 100), número de raíces, diámetro de raíces (mm) e índice de calidad de enraizamiento (cm): número de raíces \times longitud promedio de raíces.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con los promedios por unidad experimental mediante el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS OnDemand for Academics ver. 3.1.0 (SAS Institute, Inc., EUA). La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). El porcentaje de enraizamiento se transformó mediante la función arcoseno de la raíz cuadrada del valor original (expresado en fracción decimal). Después del análisis de varianza, los datos se retransformaron a sus unidades originales. El modelo estadístico empleado fue:

$$Y_{ij} = \mu + P_i + B_j + PB_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

donde Y_{ij} es el valor de la variable evaluada con el i -ésimo portainjerto y el j -ésimo bioestimulante, μ es la media general, P_i es el efecto fijo del i -ésimo portainjerto, B_j es el efecto fijo del j -ésimo bioestimulante, PB_{ij} es el efecto fijo de la interacción del i -ésimo portainjerto con el j -ésimo bioestimulante y ε_{ij} es el error experimental.

Resultados y discusión



Efecto de los bioestimulantes en las plantas donadoras de vareta

El análisis de varianza evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) entre portainjertos, tratamientos de bioestimulación y la interacción portainjerto \times bioestimulante en la mayoría de las variables evaluadas en las plantas donadoras de vareta (Cuadro 3). El portainjerto ‘Duke 7’ registró el mayor número de varetas por planta donadora (25.86), seguido de ‘Zutano’ (19.02), mientras que ‘Velvick’ presentó el valor más bajo (12.83). De forma consistente, los portainjertos ‘Duke 7’ y ‘Day’ sobresalieron en el número de yemas por vareta (15.20 y 16.35, respectivamente). En cuanto al número de injertos por planta donadora, ‘Duke 7’ alcanzó el valor más alto (77.81), significativamente superior al obtenido con ‘Velvick’ (37.46).

Cuadro 3. Comparación de medias del efecto de cuatro bioestimulantes sobre el número de varetas e injertos por planta donadora y el número de yemas e injertos por vareta en cuatro portainjertos de aguacate.

Tratamiento	Número de varetas por planta donadora	Número de yemas por vareta	Número de injertos por vareta	Número de injertos por planta donadora
Portainjerto (P)				
‘Duke 7’	25.86 a	15.20 a	2.95 a	77.81 a
‘Zutano’	19.02 b	11.70 c	2.90 a	54.93 b
‘Day’	14.11 c	16.35 a	2.85 a	41.44 c
‘Velvick’	12.83 c	13.72 b	2.90 a	37.46 c
DMSH	3.14	1.17	0.29	9.16
Valor F	47.98***	39.52***	0.27 ns	53.60***
Bioestimulante (B)				
Testigo	15.72 c	12.45 b	2.37 c	37.27 c
L-aminoácidos	21.08 a	15.75 a	3.47 a	73.83 a



EAM	18.00 ab	13.60 b	2.90 b	52.06 b
<i>T. harzianum</i>	17.02 b	15.17 a	2.85 b	48.50 b
DMSH	3.13	1.17	0.29	9.15
Valor F	7.17***	22.12***	33.34***	37.87***

Interacción P × B

Valor F	0.86 ns	2.75**	0.84 ns	2.79**
CV	28.49	20.05	24.06	28.20
Media	17.96	14.24	2.90	52.92

ns: no significativo; *, **, ***: significativo a $p < 0.05$, 0.01 o 0.001, respectivamente.

DMSH: diferencia mínima significativa honesta; EAM: extracto de algas marinas; CV: coeficiente de variación. Letras diferentes en cada columna para cada factor principal indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$).

Respecto al efecto de los bioestimulantes, el tratamiento con L-aminoácidos incrementó significativamente ($p < 0.001$) el número de varetas por planta donadora, el número de yemas por vareta y el número total de injertos por planta donadora, con valores de 21.08, 15.75 y 73.83, respectivamente. En contraste, el testigo presentó los valores más bajos en todas las variables, lo que confirma el efecto positivo de la bioestimulación (Cuadro 3). El extracto de algas marinas y el *T. harzianum* también promovieron el crecimiento y la productividad de las plantas donadoras, aunque en menor magnitud que los L-aminoácidos (Figura 3).

Estos resultados evidencian que la bioestimulación constituye una estrategia agronómica eficaz para mejorar la productividad del material vegetal destinado a la propagación clonal. El efecto observado coincide con estudios previos que documentan que la aplicación de aminoácidos favorece la asimilación nutrimental y mejora el rendimiento vegetal (Sun et al., 2024). Estos beneficios se relacionan con su función como fuente de nitrógeno y con su papel en la regulación de respuestas fisiológicas (Rahman et al., 2024).

El bioestimulante de L-aminoácidos presentó una composición dominada por glicina (15.13 %), alanina (6.9 %), ácido glutámico (6.6 %), prolina (6.2 %) y lisina (5.0 %), compuestos que participan en múltiples procesos fisiológicos relevantes para el desarrollo de las plantas. La glicina puede estimular la actividad de enzimas del ciclo de Calvin y mejorar la capacidad



fotosintética (Niu et al., 2023). La alanina mitiga el estrés oxidativo y favorece la respiración nocturna (Guek et al., 2023), lo que contribuye al vigor vegetativo. El ácido glutámico participa en el metabolismo del nitrógeno y en la síntesis de clorofila, con efectos directos sobre la eficiencia fotosintética (Liao et al., 2022). La prolina interviene en la osmorregulación y en la señalización asociada a la actividad mitocondrial y a la expresión génica relacionada con la recuperación en condiciones de estrés (Szabados & Saviouré, 2010). Finalmente, la lisina participa en mecanismos de adaptación al estrés osmótico y salino (Yang et al., 2020). El efecto conjunto de estos aminoácidos y otros presentes en menores concentraciones en el bioestimulante aplicado explica las respuestas observadas.

La eficiencia de los bioestimulantes dependió del portainjerto, donde la combinación 'Duke 7' × L-aminoácidos resultó la más productiva. En los demás portainjertos, el número de varetas por planta donadora disminuyó gradualmente: 'Zutano' (17-22), 'Day' (11-17) y 'Velvick' (12-13), sin diferencias estadísticas entre tratamientos (Figura 3a). Estos resultados evidencian la importancia del portainjerto en esta variable.

En cuanto al número de yemas, el tratamiento con *T. harzianum* superó al testigo y mostró un desempeño comparable con L-aminoácidos en 'Duke 7' y 'Day' (Figura 3b). Para el número de injertos por vareta, solo los L-aminoácidos superaron de manera consistente al testigo en todos los portainjertos evaluados (Figura 3c). Debido a que 'Duke 7' presentó el mayor número de varetas por planta, también acumuló más injertos por planta donadora bajo bioestimulación con L-aminoácidos. En los demás portainjertos se observaron incrementos no significativos (Figura 3d).

La propagación clonal de portainjertos de aguacate es un proceso complejo y costoso (Ernst, 1999). En este sentido, incrementar la cantidad y la calidad del material vegetal permite optimizar la producción de injertos y reducir los costos operativos. Desde una perspectiva práctica, 14 plantas donadoras de vareta tratadas con L-aminoácidos permitieron producir 1 000 injertos, mientras que el tratamiento testigo requirió alrededor de 27 plantas para alcanzar la misma cantidad. Estos resultados destacan el potencial de la bioestimulación con L-aminoácidos para mejorar la eficiencia productiva en vivero, optimizar el uso del espacio y reducir costos en la clonación del portainjerto 'Duke 7'.

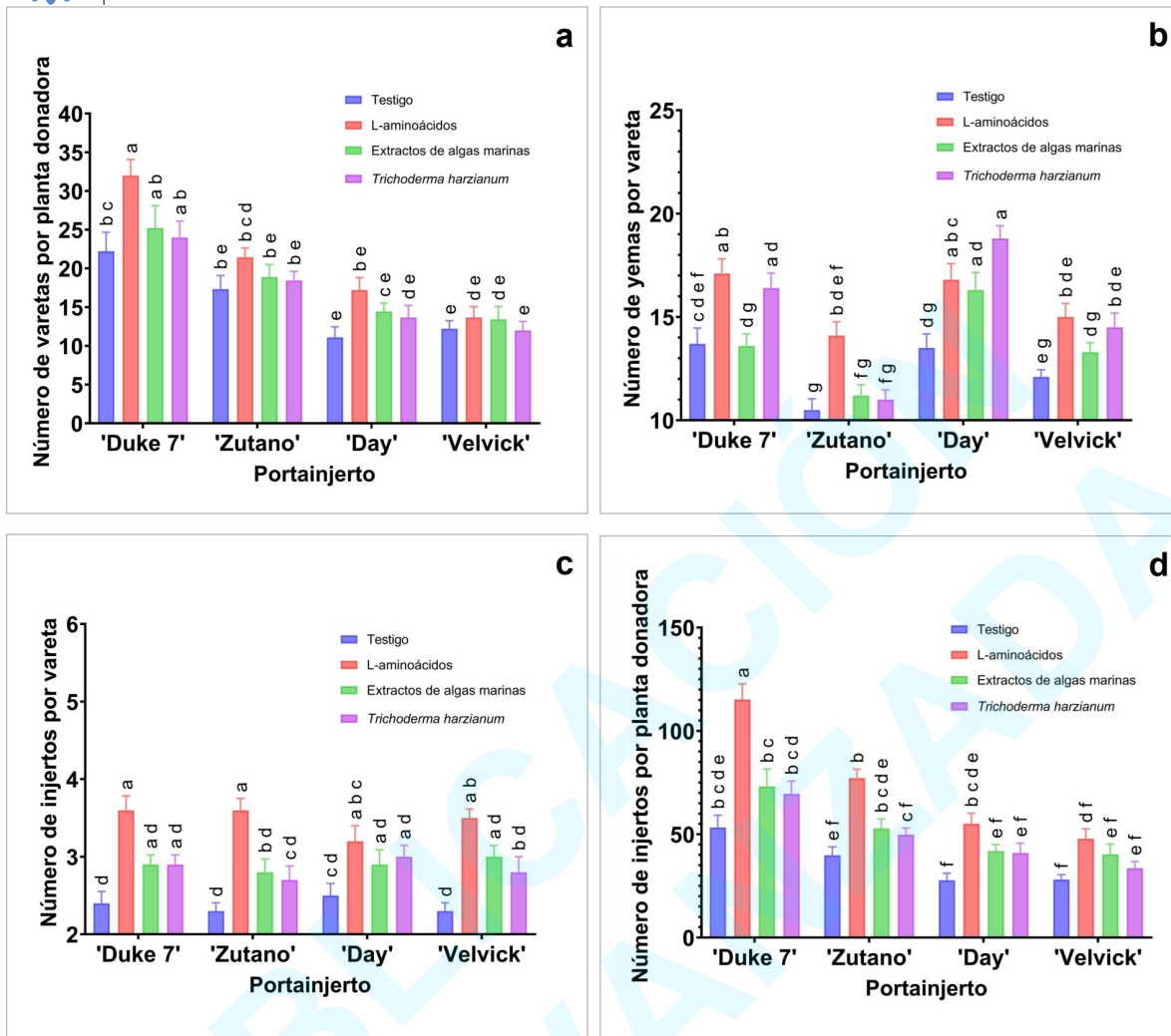


Figura 3. Comparación de medias del efecto de cuatro bioestimulantes en cuatro portainjertos de aguacate sobre algunas variables del desarrollo vegetal. Las barras verticales indican el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$).

Efecto de la bioestimulación en la formación de raíces y calidad del enraizamiento



El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en el porcentaje de enraizamiento entre los portainjertos. El número de raíces, el diámetro de raíces y el índice de calidad del enraizamiento estuvieron influenciados por el portainjerto, el tratamiento de bioestimulación y la interacción entre ambos factores (Cuadro 4).

Cuadro 4. Comparación de medias del efecto de cuatro bioestimulantes sobre el enraizamiento de cuatro portainjertos clonales de aguacate.

Tratamiento	Enraizamiento (%)	Número de raíces por brote	Diámetro de raíces (mm)	Índice de calidad de enraizamiento (cm)
Portainjerto (P)				
‘Duke 7’	100.00 a	66.60 a	1.08 c	211.57 a
‘Zutano’	95.83 a	26.89 b	1.59 a	119.28 b
‘Day’	72.91 b	11.50 c	1.37 b	49.84 c
‘Velvick’	31.25 c	1.39 d	1.01 c	4.03 d
DMSH	14.66	9.29	0.18	39.55
Valor F	65.33***	134.65***	31.43***	73.92***
Bioestimulante (B)				
Testigo	68.75 a	19.09 b	1.21 b	62.11 c
L-aminoácidos	72.91 a	33.06 a	1.44 a	133.84 a
EAM	79.16 a	25.50 ab	1.17 b	83.08 bc
<i>T. harzianum</i>	79.16 a	28.77 a	1.31 ab	105.69 ab
DMSH	14.66	9.29	0.18	39.55
Valor F	0.18 ns	5.71**	4.91**	8.58***
Interacción P × B				
Valor F	0.76 ns	4.03***	1.01 ns	4.71***
CV	20.79	37.14	14.36	43.70
Media	75.00	26.60	1.28	96.18



ns: no significativo; *, **, ***: significativo a $p < 0.05$, 0.01 o 0.001, respectivamente. DMSH: diferencia mínima significativa honesta; EAM: extracto de algas marinas; CV: coeficiente de variación. Letras diferentes en cada columna para cada factor principal indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$).

El porcentaje de enraizamiento reveló una marcada variabilidad entre portainjertos, la cual no respondió a la bioestimulación (Figura 4a). Esto confirma que el componente genético fue determinante, como lo señalan Duman et al. (2020). Dicho patrón coincide con estudios que reportan mayor capacidad rizogénica en materiales de raza mexicana respecto a la antillana (Ben-Ya'acov & Michelson, 1995; Hiti-Bandaralage et al., 2022). En este sentido, 'Duke 7' destacó por su elevada formación de raíces y mayor índice de calidad de enraizamiento, mientras que 'Velvick' mostró escasa formación de raíces (Figura 4b).

En 'Duke 7', los tres bioestimulantes incrementaron el número de raíces (Figura 4b). Este efecto se podría asociar a la acción de aminoácidos como glicina y ácido glutámico, los cuales influyen en el transporte y la sensibilidad a auxinas (Brunoni et al., 2023; Sarropoulou et al., 2016), así como a la capacidad de *Trichoderma* para inducir la síntesis de fitohormonas y favorecer la absorción de nutrientes (López-Bucio et al., 2015; Tyśkiewicz et al., 2022).

Por su parte, el diámetro de raíces no presentó modificaciones atribuibles a los tratamientos, lo que sugiere un control fisiológico intrínseco del portainjerto (Figura 4c). El índice de calidad del enraizamiento indicó que la bioestimulación mejora la arquitectura radical en portainjertos con alta capacidad rizogénica, como 'Duke 7', con efecto moderado en 'Zutano' y sin respuesta significativa en 'Day' y 'Velvick' (Figura 4d). En términos prácticos, la selección del portainjerto es determinante para lograr una propagación clonal eficiente, mientras que la bioestimulación se debe considerar como una herramienta complementaria, cuya efectividad depende de la interacción portainjerto-bioestimulante.

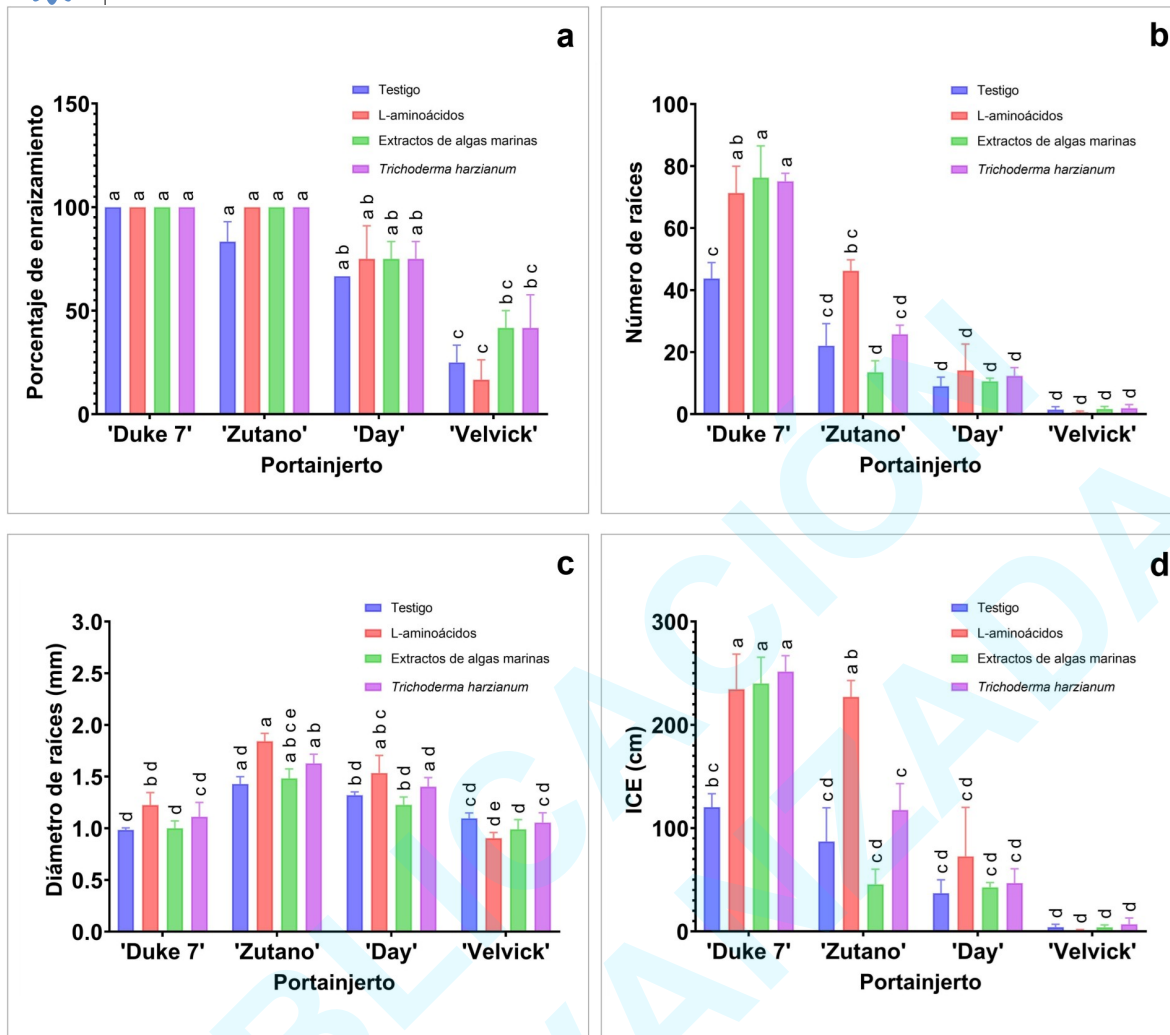


Figura 4. Comparación de medias del efecto de cuatro bioestimulantes en cuatro portainjertos de aguacate sobre algunas variables de desarrollo de raíces. ICE: índice de calidad de enraizamiento. Las barras verticales indican el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$).

La baja capacidad de enraizamiento observada en 'Velvick' coincide con investigaciones previas que documentan su tendencia a formar callo con escasa emisión radical (Hiti-Bandaralage et al., 2022). Aunque presenta atributos agronómicos favorables, como tolerancia a *P. cinnamomi*, vigor y mejor calidad de fruto (Wolstenholme, 2003), su limitada capacidad de enraizamiento restringe su uso como portainjerto clonal, al menos sin protocolos especializados (Hiti-Bandaralage et al., 2022).



En contraste, ‘Duke 7’, considerado el estándar comercial de portainjertos clonales en diversos países productores de aguacate (Kremer-Köhne & Duvenhage, 2000), combinó alto porcentaje de enraizamiento con abundante formación de raíces, lo que confirma su idoneidad para programas de propagación (Bender et al., 2013; Douhan et al., 2011).

‘Zutano’ mostró alta capacidad de enraizamiento (95.8 %) y mejoró el número y la calidad de raíces cuando las plantas donadoras recibieron L-aminoácidos. Este portainjerto es valorado por su tolerancia al frío en regiones, aunque es susceptible a *P. cinnamomi* (Crane et al., 2025; Dixon et al., 2007). Sin embargo, su propagación clonal no está tan extendida y, en varios casos, se prefiere el uso de semillas (Belisle et al., 2019).

‘Day’ presentó un desempeño intermedio en la mayoría de las variables, lo que sugiere que su potencial como portainjerto se podría optimizar mediante ajustes en los protocolos de propagación. Esto permitiría aprovechar sus atributos agronómicos, como su tolerancia a factores edáficos (Barrientos-Priego et al., 2015), a *P. cinnamomi* (Douhan et al., 2011), a la salinidad ($CE\ 2.5\ dS\cdot m^{-1}$) (Bender et al., 2013) y a carbonatos de calcio (Ben-Ya’acov & Zilberstaine, 1999b).

Un sistema radical uniforme es esencial para asegurar el crecimiento homogéneo del cultivo, ya que un sistema radical deficiente genera variabilidad en vigor, incluso con el mismo portainjerto (Cohen et al., 2022). Esta limitante resultó evidente en ‘Day’ y ‘Velvick’ (Figura 4), lo que compromete su calidad en vivero y desempeño en campo.

Desde hace varias décadas, se ha documentado que los portainjertos de las razas mexicana y guatemalteca presentan, en general, mayor capacidad de enraizamiento, mientras que los de raza antillana muestran limitaciones en su propagación vegetativa (Reuveni & Raviv, 1980). Esta tendencia coincide con los resultados del presente estudio, en el que ‘Duke 7’ y ‘Zutano’, portainjertos con características predominantes de la raza mexicana, exhibieron mayor capacidad de enraizamiento en brotes etiolados en comparación con ‘Day’ y ‘Velvick’, de origen antillano.

Los tratamientos con L-aminoácidos y *T. harzianum* incrementaron significativamente ($p < 0.05$) el número de raíces (33.06 y 28.77, respectivamente) y el índice de calidad de enraizamiento (133.84 y 105.69 cm), en comparación con el testigo (62.11 cm) (Cuadro 4).



Estos resultados indican que la bioestimulación mejora la calidad del sistema radical, aspecto clave para lograr una propagación eficiente y homogénea.

En particular, aminoácidos como glicina y ácido glutámico pueden modular la sensibilidad y el transporte de auxinas, lo que favorece la distribución homogénea de raíces en el brote (Bennett et al., 1998; Liao et al., 2022). En contraste, los brotes del testigo presentaron formación radical restringida a las zonas cercanas al punto de aplicación del enraizador (Figura 5).



Figura 5. Efecto de cuatro bioestimulantes aplicados a plantas donadoras de vareta sobre la formación y distribución de raíces en brotes etiolados de cuatro portainjertos de aguacate.

EAM: extracto de algas marinas; T: *Trichoderma*.



Conclusiones

La aplicación de L-aminoácidos a plantas donadoras de varetas incrementó significativamente la producción de varetas e injertos. Este efecto fue más evidente en el portainjerto 'Duke 7', el cual mostró la mayor eficiencia en la generación de material vegetal y en la capacidad de enraizamiento. No obstante, la respuesta a los bioestimulantes no fue uniforme entre los portainjertos ni entre las variables evaluadas, lo que confirma que el portainjerto es el factor determinante en la eficiencia de la propagación clonal.

En la fase de enraizamiento, los tratamientos con L-aminoácidos y *T. harzianum* promovieron la formación de raíces adventicias en 'Duke 7'. En contraste, los portainjertos 'Zutano', 'Day' y 'Velvick' no difirieron significativamente del testigo, lo que sugiere una menor sensibilidad a la bioestimulación.

En conjunto, la bioestimulación de las plantas donadoras de varetas representa una estrategia eficaz para optimizar la propagación clonal de aguacate. Sin embargo, su efectividad depende de la interacción específica entre el portainjerto y el bioestimulante. En portainjertos con baja capacidad de enraizamiento, como 'Day' y 'Velvick', resulta necesario desarrollar y ajustar protocolos específicos que permitan mejorar su eficiencia de propagación bajo condiciones controladas.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de Doctorado en Ciencias otorgada a Mercedes Martínez Villagómez para realizar el Doctorado en Ciencias en Horticultura en el Posgrado de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo.



A los revisores por sus observaciones y comentarios que permitieron mejorar la presentación de este manuscrito.

Referencias

- Acosta-Rangel, A. M., Li, R., Celis, N., Suarez, D. L., Santiago, L. S., Arpaia, M. L., & Mauk, P. A. (2019). The physiological response of 'Hass' avocado to salinity as influenced by rootstock. *Scientia Horticulturae*, 256, 108629. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108629>
- Barrientos-Priego, A. F., Muñoz-Pérez, R. B., Reyes-Alemán, J. C., Borys, M. C., & Martínez-Damián, M. T. (2015). Taxonomía, cultivares y portainjertos. In D. Téliz & A. Mora (Eds.), *El aguacate y su manejo integrado* (pp. 29–62). Mundi-Prensa México.
- Belisle, R. J., Hao, W., McKee, B., Arpaia, M. L., Manosalva, P., & Adaskaveg, J. E. (2019). New oomycota fungicides with activity against *Phytophthora cinnamomi* and their potential use for managing avocado root rot in California. *Plant Disease*, 103(8), 2024–2032. <https://doi.org/10.1094/pdis-09-18-1698-re>
- Ben-Ya'acov, A., & Michelson, E. (1995). Avocado rootstocks. In J. Janick (Ed.), *Horticultural Reviews* (pp. 381–429). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470650585.ch11>
- Ben-Ya'acov, A., & Zilberstaine, M. (1999a). Clonal avocado (*Persea Americana* Mill.) rootstocks in Israel. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 39–42. <https://revistas.chapingo.mx/horticultura/revista/articulos/rchshV722.pdf>
- Ben-Ya'acov, A., & Zilberstaine, M. (1999b). The possible use of avocado (*Persea americana* Mill.) germplasm material as rootstocks for soil stress conditions. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 25–28. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1999.02.015>
- Bender, G. S., Menge, J. A., & Arpaia, M. L. (2013). Avocado rootstocks. In G. S. Bender (Ed.), *Avocado production in California: a cultural handbook for growers* (pp. 45–53). University of California Cooperative Extension.



- Bennett, M. J., Marchant, A., May, S. T., & Swarup, R. (1998). Going the distance with auxin: unravelling the molecular basis of auxin transport. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 353, 1511–1515. <https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0306>
- Brunoni, F., Pěňčík, A., Žukauskaitė, A., Ament, A., Kopečná, M., Collani, S., Kopečný, D., & Novák, O. (2023). Amino acid conjugation of oxIAA is a secondary metabolic regulation involved in auxin homeostasis. *New Phytologist*, 238(6), 2264–2270. <https://doi.org/10.1111/nph.18887>
- Cohen, H., Bar-Noy, Y., Irihimovitch, V., & Rubinovich, L. (2022). Effects of seedling and clonal West Indian rootstocks irrigated with recycled water on ‘Hass’ avocado yield, fruit weight and alternate bearing. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 51(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/01140671.2022.2098779>
- Crane, J. H., Manosalva, P., Faber, B. A., Barrientos-Priego, A. F., Focht, E. D., Arpaia, M. L., Nender, G. S., & Balerdi, C. F. (2025). Cultivar and rootstocks. In D. Carrillo, B. A. Schaffer, A. W. Whiley, & B. N. Wolstenholme (Eds.), *The avocado botany, production and uses* (pp. 212-263). CAB International Publishing. <https://doi.org/10.1079/9781800621824.0000>
- Darrouy-Palacios, N., Castro-Valdebenito, M., Cautín-Morales, R., Kort-Silva, L., & Bozzolo-Artaza, R. (2010). Efecto de la posición de la yema y de la poda en plantas de aguacate destinadas a la clonación. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(3), 249–249. <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.3.249>
- Dixon, J., Elmsly, F. P., Greenwood, A. C., Smith, D. B., Pak, H., & Cutting, J. C. (2007). Effect of rootstock cultivar on ripe fruit quality. *New Zealand Avocado Growers Association*, 7, 85–90. https://www.avocadosource.com/journals/nzaga/nzaga_2007/nzaga_2007_09.pdf
- Douhan, G. W., Fuller, E., McKee, B., & Pond, E. (2011). Genetic diversity analysis of avocado (*Persea americana* Miller) rootstocks selected under greenhouse conditions for tolerance to phytophthora root rot caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Euphytica*, 182(2), 209–217. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0433-y>



- Duman, Z., Hadas-Brandwein, G., Eliyahu, A., Belausov, E., Abu-Abied, M., Yeselson, Y., Faigenboim, A., Lichter, A., Irihimovitch, V., & Sadot, E. (2020). Short de-etiolation increases the rooting of VC801 avocado rootstock. *Plants*, 9(11), 1481. <https://doi.org/10.3390/plants9111481>
- Ernst, A. (1999). Micro cloning: a multiple cloning technique for avocados using micro containers. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 217–220.
- Estay, C., Cautín, R., Neaman, A., & Castro, M. (2016). Clonal propagation of the avocado: effects of the rooting step on graft union formation and development. *Ciencia e Investigación Agraria*, 43(2), 233–241. <https://doi.org/10.4067/s0718-16202016000200006>
- Gleeson, M., Mitter, N., & Carroll, B. (2016). Etiolation-mediated regulation of adventitious rooting in avocado. *Acta Horticulturae*, 1110, 35–40. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2016.1110.6>
- Guek, G., Kumari, V., Millar, A. H., & O’Leary, B. M. (2023). Alternative oxidase 1a and 1d enable metabolic flexibility during Ala catabolism in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 192(4), 2958–2970. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad233>
- Hiti-Bandaralage, J., Hayward, A., & Mitter, N. (2022). Structural disparity of avocado rootstocks *in vitro* for rooting and acclimation success. *International Journal of Plant Biology*, 13(4), 426–442. <https://doi.org/10.3390/ijpb13040035>
- Kim, H. J., Ku, K. M., Choi, S., & Cardarelli, M. (2019). Vegetal-derived biostimulant enhances adventitious rooting in cuttings of basil, tomato, and chrysanthemum via brassinosteroid-mediated processes. *Agronomy*, 9(2), 74. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020074>
- Kremer-Köhne, S., & Duvenhage, J. A. (2000). Field testing of new avocado rootstocks for tolerance to root rot. *South African Avocado Growers’ Association*, 23, 70–71.
- Lazare, S., Haberman, A., Yermiyahu, U., Erel, R., Simenski, E., & Dag, A. (2019). Avocado rootstock influences scion leaf mineral content. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(10), 1399–1409. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1672163>



- Li, W., Ma, X., Wang, S., Huang, W., & Jiang, M. (2024). The leafy-stem-buried etiolation contributed to the high efficiency of rootstock vegetative propagation in avocado (*Persea americana*). *Horticulturae*, *10*(7), 770. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070770>
- Liao, H. S., Chung, Y. H., & Hsieh, M. H. (2022). Glutamate: A multifunctional amino acid in plants. *Plant Science*, *318*, 111238. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111238>
- López-Bucio, J., Pelagio-Flores, R., & Herrera-Estrella, A. (2015). *Trichoderma* as biostimulant: exploiting the multilevel properties of a plant beneficial fungus. *Scientia Horticulturae*, *196*, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.043>
- Martínez-Lorente, S. E., Martí-Guillén, J. M., Pedreño, M. Á., Almagro, L., & Sabater-Jara, A. B. (2024). Higher plant-derived biostimulants: Mechanisms of action and their role in mitigating plant abiotic stress. *Antioxidants*, *13*(3), 318. <https://doi.org/10.3390/antiox13030318>
- Menge, J. A., Douhan, G. W., McKee, B., Pond, E., Bender, G. S., & Faber, B. (2012). Three new avocado rootstock cultivars tolerant to phytophthora root rot: ‘Zentmyer’, ‘Uzi’, and ‘Steddom’. *HortScience*, *47*(8), 1191–1194. <https://doi.org/10.21273/hortsci.47.8.1191>
- Menzel, C. M., & Le Lagadec, M. D. (2014). Increasing the productivity of avocado orchards using high-density plantings: A review. *Scientia Horticulturae*, *177*, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.07.013>
- Mickelbart, M. V., Bender, G. S., Witney, G. W., Adams, C. A., & Arpaia, M. L. (2007). Effects of clonal rootstocks on ‘Hass’ avocado yield components, alternate bearing, and nutrition. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, *82*(3), 460–466. <https://doi.org/10.1080/14620316.2007.11512259>
- Niu, T., Zhang, J., Li, J., Gao, X., Ma, H., Gao, Y., Chang, Y., & Xie, J. (2023). Effects of exogenous glycine betaine and cycloleucine on photosynthetic capacity, amino acid composition, and hormone metabolism in *Solanum melongena* L. *Scientific Reports*, *13*(1), 7626. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34509-w>



- Pacholczak, A., & Nowakowska, K. (2020). The effect of biostimulators and indole-3-butyric acid on rooting of stem cuttings of two ground cover roses. *Acta Agrobotanica*, 73(1), 7314. <https://doi.org/10.5586/aa.7314>
- Rahman, S., Mehta, S., & Husen, A. (2024). Use of amino acids in plant growth, photosynthetic assimilation, and nutrient availability. In A. Husen (Ed.), *Biostimulants in plant protection and performance* (pp. 117–127). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15884-1.00016-6>
- Reuveni, O., & Raviv, M. (1981). Importance of leaf retention to rooting of avocado cuttings. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106(2), 127–130. <https://doi.org/10.21273/jashs.106.2.127>
- Rogel-Castellanos, I., Muñoz-Pérez, R. B., & Cruz-Castillo, J. G. (2000). Propagación de aguacatero por acodo utilizando etiolación, ácido indolbutírico, y obstrucción de savia. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 6(1), 101–104. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1999.07.049>
- Santos, K. M., Fisher, P. R., Yeager, T. H., Simonne, E. H., Carter, H. S., & Argo, W. R. (2011). Effect of petunia stock plant nutritional status on fertilizer response during propagation. *Journal of Plant Nutrition*, 34(10), 1424–1436. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.585201>
- Sarropoulou, V., Chatzissavvidis, C., Dimassi-Therious, K., & Therios, I. (2016). Effect of asparagine, cysteine, citrulline, and glutamine on in vitro rooting and biochemical constituents in cherry rootstocks. *Biologia Plantarum*, 60(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10535-015-0562-6>
- Sun, W., Shahrajabian, M. H., Kuang, Y., & Wang, N. (2024). Amino acids biostimulants and protein hydrolysates in agricultural sciences. *Plants*, 13(2), 210. <https://doi.org/10.3390/plants13020210>
- Szabados, L., & Savouré, A. (2010). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Science*, 15(2), 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>



- Tripathi, P. C., & Karunakaran, G. (2019). Standardization of time and method of propagation in avocado. *Journal of Applied Horticulture*, 21(1), 67–69. <https://doi.org/10.37855/jah.2019.v21i01.12>
- Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., & Jaroszuk-Ściseł, J. (2022). *Trichoderma*: the current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 2329. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>
- Wolstenholme, B. N. (2003). Avocado rootstocks: What do we know; are we doing enough research?. *South African Avocado Growers' Association*, 26, 106–112.
- Yang, Q., Zhao, D., & Liu, Q. (2020). Connections between amino acid metabolisms in plants: lysine as an example. *Frontiers in Plant Science*, 11, 928. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00928>