



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



**SISTEMA DE RAÍCES DE AGUACATE Y SU PERSPECTIVA PARA MANEJO
EN CONTENEDORES**

TESIS

Que como requisito parcial que para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

NANCY ELENA GONZALEZ FLOREZ

Bajo la supervisión del

Dr. Alejandro Facundo Barrientos Priego



Chapingo, Estado de México, diciembre 2025

SISTEMA DE RAÍCES DE AGUACATE Y SU PERSPECTIVA PARA MANEJO EN CONTENEDORES

Tesis realizada por **NANCY ELENA GONZALEZ FLOREZ**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIA EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



Dr. Alejandro Facundo Barrientos Priego

CO-DIRECTOR:



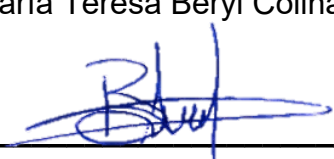
Dr. Eduardo Campos Rojas

ASESOR :



Dra. María Teresa Beryl Colinas y León

LECTOR EXTERNO:



Dra. Blanca Berenice Flores Espinosa

CONTENIDO

Resumen general.....	xii
General abstract	xiii
Capítulo 1. Introducción general.....	14
1.1. Literatura citada.....	16
Capítulo 2. Revisión de literatura.....	18
2.1. Importancia de los portainjertos.....	18
2.1.1. Portainjertos propagados por semilla.....	19
2.1.2. Portainjertos clonales.....	20
2.1.3. Portainjertos enanizantes.....	21
2.2. Interacción portainjerto/injerto.....	22
2.3. Influencia de la anatomía del portainjerto en el crecimiento del injerto.....	23
2.4. Sistema radical en aguacate y su importancia.	24
2.5. Literatura citada.....	25
Capítulo 3. Sistema radical de cinco portainjertos clonales de aguacate.....	31
Root systems of Five Clonal Avocado Genotypes.....	32
1. Introduction.....	32
2. Materials and Methods.....	33
2.1. Plant Material.....	33
2.2. Experimental Establishment.....	33
2.3. Root System Monitoring.....	34
2.4. Image Analysis and Measurement Program.....	35
2.5. Replications, Experimental Design and Statistical Analysis.....	36
3. Results.....	36
3.1. Follow-up of Complete Root System in Rhizotron.....	36
3.2. Complete Root System Outside the Rhizotron.....	37
3.3. Main Variables of Root Growth Through Image Analysis.....	39
3.4. Depuration and Principal Component Analysis (PCA) of Root Growth Variables.....	39
4. Discussion.....	42
3. Conclusions.....	44
5. References.....	44

Capítulo 4. Influencia del injerto sobre el sistema radical del portainjerto de aguacate.....	47
4.1. Introducción.....	48
4.2. Materiales y métodos.....	50
4.2.1. Material Vegetal.....	50
4.2.2. Establecimiento del experimento.....	50
4.2.3. Seguimiento de sistema de raíces.....	52
4.2.4. Programa de análisis de imágenes y mediciones.....	52
4.2.5. Repeticiones, diseño experimental y análisis estadístico.....	52
4.3. Resultados.....	54
4.3.1. Seguimiento del sistema de raíz completo en rizotróon.....	54
4.3.2. Sistema de raíz completo fuera del rizotróon.....	55
4.3.3. Variables principales de crecimiento de las raíces mediante análisis de imágenes.....	56
4.3.4. Depuración y análisis de componentes principales (ACP) de variables de crecimiento de las raíces	57
4.4. Discusión.....	61
4.5. Conclusiones.....	63
4.6. Literatura citada.....	63
Capítulo 5. Anatomía radical adventicia comparativa de seis portainjertos de aguacate	67
5.1. Introducción.....	68
5.2. Materiales y métodos.....	70
5.2.1. Material vegetal.....	70
5.2.2. Anatomía de raíces.....	71
5.2.3. Programa de análisis y medición de imágenes.....	72
5.2.4. Repeticiones, diseño experimental y análisis estadístico.....	73
5.3. Resultados.....	73
5.4. Discusión.....	77
5.5. Conclusiones.....	78
5.6. Literatura citada.....	79

LISTA DE CUADROS

Capítulo 3. Sistema radical de cinco portainjertos clonales de aguacate

Root systems of Five Clonal Avocado Genotypes

Table 1. Avocado genotypes studied and their root system characteristics..34

Table 2. Root variables evaluated in cloned avocado genotypes according to RhizoVision Explorer software.....35

Table 3. Eigen values and accumulated variance of principal component analysis of avocado genotypes adventitious root system variables. Obtained after rhizotron extraction and image analysis.....42

Capítulo 4. Influencia del injerto sobre el sistema radical del portainjerto de aguacate

Cuadro 1. Genotipos de aguacate estudiados y sus características.....51

Cuadro 2. Variables radicales evaluadas en portainjerto antillano injertados con cinco cultivares de aguacate según el programa RhizoVision Explorer.53

Cuadro 3. Valores propios y varianza del análisis de componentes principales de las variables del sistema radical de aguacate antillano injertado con cinco genotipos, obtenido después de su extracción de rizotrones y el análisis de imágenes.....59

Cuadro 4. Valores propios de las variables que forman los cuatro componentes principales (CP) del sistema radical de aguacate antillano injertados con cinco genotipos, obtenido después de su extracción de rizotrones y el análisis de imágenes.....59

Capítulo 5. Anatomía radical adventicia comparativa de seis portainjertos de aguacate

Cuadro 4. Genotipos clonales de aguacate.....70

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 3 Sistema radical de cinco portainjertos clonales de aguacate

Root systems of Five Clonal Avocado Genotypes

- Figure 1.** Depths of the adventitious root systems of avocado genotypes, obtained from the monitoring of rhizotrons using digital photographs.....36
- Figure 2.** Widths of the adventitious root systems of avocado genotypes, obtained from monitoring rhizotrons using digital photographs.....37
- Figure 3.** Depth/width ratios of the adventitious root systems of avocado genotypes, obtained from monitoring rhizotrons using digital photographs..37
- Figure 4. (A)** Depths and **(B)** widths of the adventitious root systems of avocado genotypes, obtained after extraction of rhizotrons.....38
- Figure 5.** Adventitious root systems of avocado genotypes after removal from rhizotrons.....38
- Figure 6.** Volumes of the adventitious root systems of avocado genotypes obtained after extraction from rhizotrons.....39
- Figure 7.** Morphological variables of the adventitious root system of avocado genotypes after removal from the rhizotrons: **(A)** maximum number of roots, **(B)** number of root tips, **(C)** total root length, **(D)** root network area and **(E)** average root diameter.....40
- Figure 8.** Dispersion of avocado genotypes in the first factorial plane of the first two functions of the principal component analysis (PC), derived from adventitious root system characteristics. PC 1: Root network area (mm^2) and root diameter in the second layer (mm). PC 2: Projected root diameter in the second layer (mm), root network area (mm^2) and root depth (mm).....41
- Figure 9.** Clustering of avocado genotypes with the neighbor-joining method and Manhattan distance with 10,000 resamples, derived from adventitious root system characteristics. The values in the branches are the probability as a percentage of occurrence according to the bootstrap.....42

Capítulo 4. Influencia del injerto sobre el sistema radical del portainjerto de aguacate

Figura 1. Profundidad del sistema radical de aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido del seguimiento de rizotrones mediante fotografías digitales.....	54
Figura 2. Ancho del sistema radical aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido del seguimiento de rizotrones mediante fotografías digitales.....	55
Figura 3. Relación profundidad/anchura del sistema radical aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido del seguimiento de rizotrones mediante fotografías digitales.....	55
Figura 4. A) profundidad y B) ancho del del sistema radical aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido después de su extracción de rizotrones.....	56
Figura 5. Volumen sistema radical aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido después de su extracción de rizotrones.....	57
Figura 6. Variables morfológicas del sistema de radical de genotipos de aguacate después de ser retirados del rizotrón. A) número máximo de raíces, B) número de puntas de raíz, C) longitud total de la raíz, D) diámetro promedio de raíces.....	58
Figura 7. Sistema radical de aguacate Antillano injertado con cuatro genotipos enanos y uno vigoroso ('Encinos'), después de ser retirados de rizotrones. Escala de 30 cm.....	59
Figura 8. Dispersión del aguacate antillano injertados con cinco cultivares en el primer plano factorial de las dos primeras funciones del análisis de componentes principales.....	60
Figura 9. Agrupación del aguacate antillano injertados con cinco genotipos con el método de unión de vecinos y distancia Manhattan con 10000 remuestreos, derivados de las características del sistema radical. Los valores en las ramas son la probabilidad como porcentaje de ocurrencia.....	60

Capítulo 5. Anatomía radical adventicia comparativa de seis portainjertos de aguacate

Figura 1. Sección trasversal de raíz adventicia de aguacate 'Fundación II' clonal (10X).....	73
Figura 2. Secciones transversales de raíz adventicia de seis genotipos de aguacate. A) 'Duke 7', B) 'Fundación II', C) 'San Martin', D) 'Misterioso', E) 'Colin V-33' y F) 'Don Cris Enano', Escala de 100 micras.....	74
Figura 3. Diámetro de raíz adventicia de seis genotipos de aguacate propagados clonalmente.....	74
Figura 4. Proporciones de raíz adventicia de seis genotipos de aguacate clonados. A) Epidermis, B) Córtex, C) Endodermis y D) Estela.....	75
Figura 5. Frecuencia y área de elementos de vaso de xilema en raíces adventicias de seis genotipos de aguacate clonados.....	76

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo cariño y gratitud a mis padres, cuyo apoyo inquebrantable y ejemplo de esfuerzo han sido la base de cada paso en mi camino. A mis hermanos, por su fraternidad y respaldo constante; a mis sobrinos, que con su alegría me inspiran a seguir adelante; y a mi pareja, por su compañía, comprensión y aliento en los momentos más desafiantes. Extiendo también esta dedicatoria a todas las personas que, de una u otra forma, me acompañaron en este proceso, brindándome su apoyo y motivación para alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) ahora SECIHTI por el apoyo económico proporcionado para el desarrollo de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y a la coordinación de posgrado de fitotecnia, por abrirme sus puertas y brindarme las herramientas académicas y formativas necesarias para enfrentar con mayor solidez los desafíos profesionales y científicos venideros.

Al Dr. Alejandro F. Barrientos Priego, mi director de tesis, por su invaluable guía, confianza y enseñanzas, que marcaron de manera significativa mi proceso formativo.

Al Dr. Eduardo Campos Rojas, mi Codirector, por acogerme con generosidad y brindarme su apoyo constante durante el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Prometeo Sánchez García, por su acompañamiento cercano y los conocimientos compartidos a lo largo de este proceso académico.

A la Dra. María Teresa Beryl Colinas y León, por su paciencia, orientación y valiosas enseñanzas, que fueron fundamentales para la correcta conducción de este trabajo.

A la Dra. Blanca Berenice Flores Espinosa, por su acompañamiento y sabios consejos.

A la Fundación Salvador Sánchez-Colín-CICTAMEX, S.C., y de manera especial a la Dra. María de la Cruz Espíndola Barquera, por facilitarme el material vegetal indispensable para la investigación.

A la Dra. Mónica Castro y al Dr. Ricardo Cautín por recibirme en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso para una estancia de investigación, por su valiosa orientación, apoyo académico, calidez humana y por compartir sus experiencias y conocimientos.

Finalmente, a mis amigos y compañeros del posgrado, por su apoyo y colaboración, que hicieron más enriquecedor y llevadero este camino académico.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombres y apellidos	Nancy Elena Gonzalez Florez
Fecha de nacimiento	03 de mayo de 1992
Lugar de nacimiento	Pensilvania-Caldas / Colombia
CURP	GOFN920503MNENLN09
Cédula profesional	12893533

Desarrollo académico

Doctorado	Doctorado en ciencias en Horticultura Universidad Autónoma Chapingo / México
Maestría	Maestría en ciencias en Horticultura Universidad Autónoma Chapingo / México
Pregrado	Administradora de empresas agropecuarias Ingeniera agrónoma Universidad de Caldas / Colombia

RESUMEN GENERAL

SISTEMA DE RAÍCES DE AGUACATE Y SU PERSPECTIVA PARA MANEJO EN CONTENEDORES¹

El aguacate (*Persea americana* Mill.) se ha consolidado entre los frutales de mayor relevancia comercial a nivel mundial, con incremento de la superficie cultivada lo que impulsa la necesidad de optimizar los sistemas productivos, como el manejo de plantas en contenedores mediante la selección de portainjertos adecuados. El presente trabajo está conformado por tres artículos donde se evaluó las características morfológicas y anatómicas del sistema radical de distintos genotipos con el objetivo de identificar materiales con potencial para sistemas de cultivo intensivo. Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA), comparaciones de medias Tukey ($P \leq 0.05$) y correlaciones de Pearson. En el primer artículo se encontró que los genotipos enanos de entrenudos cortos, 'San Martín' y 'Misterioso', presentaron menor crecimiento y exploración radical, características deseables para el cultivo en contenedores, en contraste 'Duke 7' exhibió un notable desarrollo lateral, lo que podría hacerlo adecuado para suelos superficiales. El segundo artículo se encontró que el injerto influyó en el desarrollo del sistema radical del portainjerto Antillano; la combinación 'San Martín'/Antillano presentó el menor desarrollo radical, lo que sugiere su uso como interinjerto para reducir el vigor vegetativo. En el tercero, el análisis anatómico reveló diferencias estructurales asociadas a la eficiencia hidráulica: 'Misterioso' mostró mayor frecuencia de vasos de xilema, vinculada a menor vulnerabilidad a la cavitación, mientras que 'Don Cris Enano' presentó mayor área de xilema, indicando mayor capacidad de conducción. En conclusión, la selección de materiales genéticos para el cultivo de aguacate debe integrar la arquitectura y anatomía radical, junto con la interacción injerto/portainjerto, para la producción de aguacates en contenedores eficientes.

Palabras claves: *Persea americana* Mill., sistema radical, portainjertos enanizantes.

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Nancy Elena Gonzalez Florez
Director de tesis: Dr. Alejandro Facundo Barrientos Priego

GENERAL ABSTRACT

ASPECTS OF AVOCADO PLANT MANAGEMENT IN CONTAINERS²

Avocado (*Persea americana* Mill.) has become one of the most commercially important fruit crops worldwide, with a continuous increase in cultivated areas, which drives the need to optimize production systems, such as container-grown plant management through the selection of suitable rootstocks. This study comprises three research articles that evaluated the morphological and anatomical characteristics of the root system of different genotypes, aiming to identify materials with potential for intensive cultivation systems. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA), Tukey's mean comparison test ($P \leq 0.05$), and Pearson's correlation analysis. The first article found that the dwarf genotypes with short internodes, 'San Martín' and 'Misterioso', showed reduced root growth and exploration, traits desirable for container cultivation, whereas 'Duke 7' exhibited greater lateral root development, which may make it suitable for shallow soils. The second article demonstrated that the graft influenced the root system development of the Antillean rootstock; the combination 'San Martín'/Antillano showed the lowest root growth, suggesting its potential use as an interstock to reduce vegetative vigor. In the third article, the anatomical analysis revealed structural differences associated with hydraulic efficiency 'Misterioso' showed a higher frequency of xylem vessels, related to lower vulnerability to cavitation, while 'Don Cris Enano' exhibited a greater xylem area, indicating a higher conductive capacity. In conclusion, the selection of genetic materials for avocado cultivation should integrate root architecture and anatomy, together with scion–rootstock interactions, as a basis for developing more efficient and resilient container production systems.

Keywords: *Persea americana* Mill., root system, dwarfing rootstocks

² Doctoral Thesis in Horticultural Sciences, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Nancy Elena Gonzalez Florez
Advisor: Dr. Alejandro Facundo Barrientos Priego

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El aguacate (*Persea americana* Mill.) se ha consolidado entre los veinte frutales de mayor importancia comercial a nivel mundial, experimentando una expansión significativa en su superficie de cultivo (Castro et al., 2015). El aumento en su demanda global ha impulsado la intensificación de los sistemas de producción, lo que ha puesto de manifiesto diversas limitaciones tecnológicas que afectan su productividad y sostenibilidad. Entre los principales desafíos se encuentran los suelos salinos o carbonatados, la incidencia de *Phytophthora cinnamomi* (agente causal de la "tristeza del aguacate"), y el uso generalizado de portainjertos provenientes de semillas (Castro et al., 2008). Ante este escenario, la selección de un portainjerto adecuado se vuelve crucial, ya que influye directamente en el establecimiento, rendimiento y longevidad del cultivo.

La propagación vegetativa se ha posicionado como una herramienta clave para superar las limitaciones de la propagación por semilla, permitiendo la obtención de portainjertos clonales con características deseables y mayor uniformidad genética (Darrouy et al., 2010). A diferencia de los portainjertos originados de semilla, en los que la polinización cruzada genera heterogeneidad y variabilidad genética incluso dentro de una misma progenie los portainjertos clonales mantienen la identidad genética de la planta madre, lo que asegura un desarrollo más uniforme (Salazar-García et al., 2016). Sin embargo, la eficacia de la propagación vegetativa depende en gran medida del manejo de las plantas madre, ya que factores como la poda, la fertilización, el balance de carbohidratos y la regulación de la luz influyen directamente en la capacidad de enraizamiento y en la calidad morfológica y fisiológica de los brotes (Darrouy et al., 2010). La adecuada disponibilidad de reservas energéticas, especialmente carbohidratos, también es determinante para reducir pérdidas durante la injertación y mejorar el establecimiento de las plantas (Darrouy et al., 2010).

El portainjerto es a menudo considerado “la mitad escondida” de la planta, ya que el sistema radical, aunque poco visible, desempeñan un papel central en la fisiología, el crecimiento y la productividad del cultivo (Barrientos-Priego 2017). Este componente regula la absorción de agua y nutrientes, la tolerancia a estrés biótico y abiótico, y condiciona la interacción funcional con el injerto (Salazar-García et al., 2016). La elección del portainjerto y su interacción con el injerto afectan el vigor vegetativo, el tiempo de floración, la arquitectura de la copa, la calidad del fruto y el rendimiento (Montesinos et al., 2022). La mejora genética del sistema radical es una prioridad para aumentar la tolerancia al estrés y la eficiencia en el uso de recursos (Blois et al., 2023), una importancia que se acentúa en el aguacate debido a su gran diversidad genética (López-Guzmán et al., 2015). En los últimos años, la investigación en portainjertos enanizantes ha ganado relevancia, ya que permiten controlar el vigor de la copa, reducir los costos de manejo y facilitar sistemas de alta densidad de plantación, aumentando la eficiencia (Lesmes-Vesga et al., 2021).

El estudio del sistema radical en aguacate presenta dificultades metodológicas, lo que ha limitado el conocimiento detallado de su comportamiento. No obstante, técnicas modernas como el uso de rizotrones han permitido una visualización más realista del crecimiento y la distribución de las raíces (Holzgreve et al., 2019). Asimismo, el tamaño y volumen radicular se han propuesto como criterios fundamentales para evaluar la calidad de las plantas, ya que se correlacionan con la capacidad de absorción de agua y nutrientes, la supervivencia tras el trasplante y el crecimiento inicial en campo (Alzugaray et al., 2004).

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo general identificar el comportamiento de seis genotipos de aguacate, tanto normales como enanos, establecidos en contenedores, tanto como portainjerto como injerto, y se evaluó su desempeño como portainjerto e injerto. El fin fue generar información que contribuya a la comprensión de la interacción injerto/portainjerto y su efecto en el comportamiento de crecimiento radicular.

1.1. Literatura citada

- Alzugaray, P., Haase, D., & Rose, R. (2004). Efecto del volumen radicular y la tasa de fertilización sobre el comportamiento en terreno de plantas de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) producidas con el método 1+1. *Bosques* 25(2), 17-33. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002004000200003>
- Barrientos-Priego, A. F. (2017). Presente y futuro de los portainjertos y variedades de Aguacate en el mundo y México. In S. Salazar García & A. F. Barrientos-Priego (Eds.). *Memorias del V congreso latinoamericano del aguacate* (pp. 2-15). Asociación de Productores y Exportadores de Jalisco (APEAJAL).
- Blois, L., de Miguel, M., Bert, P. F., Ollat, N., Rubio, B., Voss-Fels, K. P., Schmid, J., & Marguerit, E. (2023). Dissecting the genetic architecture of root-related traits in a grafted wild *Vitis berlandieri* population for grapevine rootstock breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 136(11), Article 223. <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04472-1>
- Castro, M., Fassio, C., & Darrouy, N. (2008). Portainjertos de aguacate en Chile. *Horticultura Internacional* 62, 42-46.
- Castro, M., Fassio, C., Cautin, R., & Ampuero, J. (2015). UCV7, Portainjerto de aguacate tolerante a salinidad. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38(1), 85-92.
- 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), 249-256.
- Holzgreve, H., Eick, M., & Stöhr, C. (2019). Protease activity in the rhizosphere of tomato plants is independent from nitrogen status. In T. Ohshima (Ed.). *Root biology-growth, physiology, and functions*. (pp 3-16). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87862>
- Lesmes-Vesga, R. A., Chaparro, J. X., Sarkhosh, A., Ritenour, M. A., Cano, L. M., & Rossi, L. (2021). Effect of propagation systems and indole-3-butyric acid potassium salt (K-IBA) concentrations on the propagation of peach rootstocks by stem cuttings. *Plants* 10(6), Article 1151; <https://doi.org/10.3390/plants10061151>
- López-Guzmán, G., Medina-Torres, R., Guillén-Andrade, H., Ramírez-Guerrero, L. G., Juárez-López, P., & Ruelas-Hernández, P. G. (2015). Caracterización morfológica en genotipos nativos de aguacate (*Persea americana* Mill.) de clima tropical en Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11, 2157-2163. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.785>

- Montesinos, Á., Grimplet, J., & Rubio-Cabetas, M. J. (2022). Proleptic and sylleptic shoot formation is affected by rootstock genotype in two-year-old branches of almond. *Agronomy* 12, Article 2006. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092006>
- Salazar-García, S., Medina-Torres, R., Ibarra-Estrada, M. E., & González-Valdivia, J. (2016). Influence of clonal rootstocks on leaf nutrient concentrations in 'Hass' avocado grown without irrigation. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 22(3), 161-175. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.06.013>

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

El aguacate (*Persea americana* Mill.) tiene como centro de origen a América (Avilán et al., 1992). Su distribución natural va desde México hasta Perú, pasando por Centro América, Colombia, Venezuela y Ecuador (Téliz, 2000). El origen de casi todos los miembros reconocidos del subgénero *Persea* acaecen primariamente en la misma región geográfica desde la parte central de México, a través de Guatemala hasta gran parte de Centroamérica, como evidencia están los hallazgos de aguacates primitivos en la Sierra Madre Oriental en el estado de Nuevo León, México, hasta Costa Rica en Centroamérica (Sánchez-Pérez, 1999). La evidencia más antigua del consumo de esta fruta data de 10,000 años aC. y fue encontrada en una cueva localizada en Coxcatlán, Puebla (Sánchez et al., 1998). Las tres razas hortícolas del aguacate presentan diferencias en la sensibilidad a las condiciones ambientales de temperaturas extremas, sequía, exceso o déficit de precipitación salinidad, alcalinidad y pobre aireación del suelo, factores que pueden causar estrés e impedir el desarrollo del sistema radicular (Alberti et al., 2018).

2.1. Importancia de los portainjertos

Los portainjertos son fundamentales en la agricultura, ya que no solo actúan como soporte físico para el injerto, sino que también confieren al árbol características esenciales para su supervivencia y productividad. Determinan la resiliencia frente a estreses bióticos y abióticos, como salinidad, sequía, temperaturas extremas y metales pesados (Zhou et al., 2022). lo que permite mitigar la variabilidad en los cultivos, conferir tolerancia a patógenos y a condiciones edáficas adversas, y regular el vigor del árbol lo cual es esencial para el manejo eficiente del cultivo. Asimismo, influyen en la absorción de nutrientes y en el uso eficiente del agua, lo que se traduce en un mejor vigor y en una arquitectura del árbol más deseable (Gautier et al., 2019).

Esta influencia no es uniforme; estudios como los de Ben-Ya'acov (1987) y Kohne (1992) han demostrado que diferentes portainjertos pueden afectar de manera distinta el crecimiento, la fenología y la capacidad reproductiva del injerto. Investigaciones posteriores en frutales perennes refuerzan esta idea, y evidencia que la elección del portainjerto puede modular la productividad, la arquitectura y la adaptación del árbol frente a condiciones ambientales y a factores bióticos (Liang et al., 2025).

En el aguacate, un portainjerto adecuado se selecciona no solo por su resistencia, sino también por su capacidad de producir árboles longevos y de porte bajo que faciliten el manejo y la cosecha sin sacrificar el rendimiento por área (Barrientos & Barrientos, 1996). Su tolerancia a condiciones adversas resulta decisiva, ya que influye en la resistencia a enfermedades del suelo, como la pudrición radicular causada por *Phytophthora cinnamomi* (Zentmyer et al., 1963; Hayat et al., 2021). Estudios recientes confirman que la elección del portainjerto determina respuestas fisiológicas clave frente al estrés hídrico y a patógenos, donde con 'Hass' algunos portainjertos tolerantes a *Rosellinia necatrix* mejoran las relaciones hídricas bajo déficit de agua (Moreno-Pérez et al., 2024), mientras que en etapas tempranas del cultivo distintos genotipos muestran respuestas contrastantes al estrés hídrico y al establecimiento inicial (Rondón et al., 2024).

La elección del portainjerto impacta directamente en el rendimiento y la calidad del fruto, siendo la compatibilidad fisiológica con el injerto un factor clave para asegurar una productividad alta y estable (Salazar-García et al., 2016). Estas características también dependen de la interacción del portainjerto con el clima y la composición del suelo. En aguacate tradicionalmente se han empleado portainjertos propagados por semillas, pero los métodos de propagación clonal han tomado relevancia debido a su capacidad para abordar varias limitaciones que presentan los portainjertos convencionales (Alberti et al., 2018).

2.1.1. Portainjertos propagados por semilla

La propagación por semilla es el método más antiguo y sencillo, ya que permite obtener plántulas vigorosas con un sistema radical profundo y bien

desarrollado, lo que mejora la adaptación a condiciones de estrés hídrico o edáfico (Ben-Ya'acov & Michelson, 1995). El aguacate (*Persea americana* Mill.) es una especie de polinización cruzada y altamente heterocigótica, lo que implica que la multiplicación por semilla genera una progenie muy variable en términos de morfología, vigor, productividad y resistencia a factores bióticos y abióticos (Alberti et al., 2018). Esta variabilidad genética entre los descendientes se asocia también con un largo período juvenil (Kasana et al., 2024). Esta heterogeneidad se traduce en árboles con características agronómicas y comerciales poco uniformes, como el tamaño, forma y calidad del fruto (Menzel et al., 2014; López-Galé et al., 2022). A pesar de estas limitaciones, la propagación por semilla continúa siendo un método tradicional utilizado en diversos países, principalmente para la producción de portainjertos.

2.1.2. Portainjertos clonales

La propagación clonal se ha vuelto crucial en países con altos niveles tecnológicos, como Israel, Australia, Sudáfrica y Estados Unidos, para obtener portainjertos con características agronómicas superiores. A diferencia de la propagación por semilla, este método asegura la uniformidad genética de las plantas, lo que es ideal para huertos comerciales (Alberti et al., 2018). Los portainjertos clonales se seleccionan por su mayor productividad y resistencia a patógenos como *Phytophthora cinnamomi* y por su adaptación a distintos tipos de suelo (Sánchez-González et al., 2019), así como por su resistencia a la sequía, la salinidad y la variabilidad en el suelo. Los métodos clonales más conocidos son las técnicas de Frolich & Platt (1972); Ernst & Holtzhausen (1978), y Brokaw (1975), utilizan un proceso de injerto en plántulas "nodriza" de semilla, seguido de etiolación (crecimiento en oscuridad) y anillado de los brotes para inducir el enraizamiento. Esto permite obtener plantas genéticamente idénticas a la planta madre seleccionada. Aunque la producción de plantas clonales es más compleja y costosa que la de plantas de semilla, ofrece ventajas significativas en términos de rendimiento y adaptabilidad (Alberti et al., 2018).

En la propagación clonal se generan raíces adventicias que es un tipo de raíz que se forma a partir de tejidos no radicales (Ricci et al., 2023), estas se pueden formar en tallos (Shen et al., 2021), debido a la plasticidad del desarrollo de las células vegetales. Este proceso puede ser influido por factores endógenos (genotipo, madurez de la planta madre, condiciones nutricionales y balance hormonal), factores exógenos como estrés ambiental, como heridas, inundaciones, etiolación y deficiencia de nutrientes (Ricci et al., 2023) o por estímulos externos y aplicación de auxinas, consideradas como los reguladores de crecimiento más importantes en la formación de raíces adventicias (Costa et al., 2017). Las raíces adventicias desempeñan un papel fundamental en la reproducción vegetativa de las plantas (Díaz-Sala, 2020).

2.1.3. Portainjertos enanizantes

Los portainjertos enanizantes son una herramienta clave en la fruticultura moderna porque permiten sistemas de alta densidad, facilitan la cosecha y mejoran la eficiencia en el uso de recursos. Estos modifican el fenotipo del injerto al regular el vigor vegetativo, la precocidad, el tamaño y la calidad del fruto, así como la tolerancia a estrés biótico y abiótico (Hayat et al., 2021). El enanismo se ha relacionado con factores anatómicos, fisiológicos y hormonales, como la reducción del diámetro de vasos en el xilema, menor conductancia hidráulica y limitaciones en el transporte de agua, nutrimentos y carbohidratos hacia la parte aérea (Zhou et al., 2020; Martínez-Alcántara et al., 2013). Además, la interacción patrón–injerto resulta determinante al modificar la comunicación hormonal, reduciendo auxinas, giberelinas y citoquininas, e incrementando el ácido abscísico, lo que limita el porte del árbol (Van Hooijdonk et al., 2011).

A nivel genético, se han identificado loci asociados al enanismo, como *Dw1* y *Dw2* en manzano, que explican la reducción del vigor (Foster et al., 2015). En aguacate, los portainjertos enanizantes son esenciales para reducir el tamaño de los árboles, facilitar labores de manejo y aumentar la productividad; su uso puede duplicar rendimientos por hectárea y reducir hasta en dos tercios los costos de cosecha (Thorp & Hallett, 1999). Asimismo, influyen en el rendimiento, la calidad del fruto y la resistencia a plagas, con efectos

heredables sobre caracteres productivos (Reyes-Herrera et al., 2020). Entre los materiales evaluados, el cultivar Colín V-33 ha mostrado potencial enanizante, ya que como injerto intermedio redujo en 43 % la altura de 'Fuerte' (Barrientos-Priego et al., 1986). En conjunto, estas evidencias destacan a los portainjertos enanizantes como una estrategia de intensificación sostenible, al integrar mecanismos fisiológicos, moleculares y de manejo que permiten sistemas frutales más eficientes y adaptados a distintos ambientes (Verma et al., 2024).

2.2. Interacción portainjerto/injerto

La interacción entre el portainjerto y el injerto es un proceso complejo y bidireccional que va más allá de una simple unión física. Esta práctica, fundamental para la propagación de árboles frutales (Álvarez, 2020), desencadena una serie de cambios a nivel fisiológico, bioquímico y molecular que influyen en el desarrollo, el crecimiento y la resistencia de la planta (Habibi et al., 2022). Una vez realizada la unión, se inicia un proceso de cicatrización que forma un callo y un nuevo cambium vascular, lo que permite una comunicación activa a través del xilema y el floema (Rasool et al., 2020). Esta comunicación es vital, ya que permite el transporte de moléculas como proteínas y ARN mensajero (ARNm) que son cruciales para la regulación del desarrollo y la resistencia de la planta (Zhou et al., 2022).

La influencia del portainjerto en el injerto es notable y se manifiesta de diversas maneras. El portainjerto puede modificar los patrones de crecimiento, la absorción de nutrientes y la utilización del agua, todo gracias a la arquitectura de su sistema de raíces y a sus interacciones con el suelo (Gautier et al., 2019). Esta modificación se debe en gran parte a la señalización hormonal, en la que las auxinas juegan un papel fundamental al facilitar la comunicación entre ambas partes (Habibi et al., 2022; Rasool et al., 2020). Además, la comunicación no se limita a las hormonas; el transporte bidireccional de proteínas y pequeños ARN a través de la unión puede afectar la expresión genética del injerto, y puede alterar sus rasgos fenotípicos (Kapazoglou et al., 2021). Incluso, cambios epigenéticos como la metilación

del ADN pueden influir en las características hereditarias de la planta, mejorando su rendimiento (Kapazoglou et al., 2021).

A pesar de los múltiples beneficios de la interacción entre el portainjerto y el injerto, su éxito depende de la compatibilidad. Si bien esta práctica mejora la calidad del fruto, la resistencia al estrés y el rendimiento de la planta, la compatibilidad puede verse limitada por factores como la distancia genética, las respuestas fisiológicas y las deformidades anatómicas que se pueden presentar en la unión (Rasool et al., 2020; Habibi et al., 2022). Comprender estas complejas interacciones y los mecanismos subyacentes permiten optimizar la selección de portainjertos y variedades, lo que conduce a una mejor calidad del fruto, mayor resistencia al estrés y un aumento en el rendimiento del cultivo.

2.3. Influencia de la anatomía del portainjerto en el crecimiento del injerto

La anatomía del portainjerto influye de manera decisiva en el éxito y crecimiento del injerto, ya que sus características estructurales y funcionales afectan directamente la compatibilidad y la eficiencia en el transporte de recursos. Una compatibilidad anatómica alta entre el injerto y el portainjerto es fundamental para evitar problemas como deformidades, obstrucciones en el flujo de savia y fallos en la unión (Fassio, 2021). Un ejemplo claro es el portainjerto de mango ‘Espada’, que mostró gran compatibilidad con los cultivares Keitt y Palmer (Santos et al., 2024), así como la unión exitosa entre el injerto de tomate y el portainjerto *Solanum torvum*, facilitada por una integración vascular completa (Pugalendhi et al., 2021).

La estructura de los tejidos conductores, como xilema y floema, es crucial para la funcionalidad de la unión. El xilema, en particular, determina la capacidad de conducción hidráulica del portainjerto, lo que afecta directamente el crecimiento del injerto. Características como el tamaño y la densidad de los vasos son determinantes, ya que portainjertos con vasos más grandes y un área de lumen mayor facilitan el suministro de agua y nutrientes, lo que promueve un crecimiento más vigoroso (Casierra-Posada et al., 2009; Narandžić & Ljubojević, 2022). Un ejemplo de esto se observa en los cerezos,

donde los tamaños óptimos de los vasos están directamente relacionados con una mejor absorción de agua y un mayor vigor de la planta (Narandžić & Ljubojević, 2022).

Además de la conducción, la anatomía del portainjerto también regula el crecimiento y las respuestas fisiológicas del injerto. La porosidad del xilema y la conductividad hidráulica favorecen el desarrollo vegetativo eficiente (Narandžić & Ljubojević, 2022). Sin embargo, un crecimiento desproporcionado del injerto puede causar desajustes en el tallo y comprometer la estabilidad (Pugalendhi et al., 2021). El portainjerto puede incluso controlar el vigor y el tamaño de la planta a través de su anatomía, como una menor proporción de vasos grandes y una mayor densidad de tejido leñoso, lo que resulta útil en sistemas agrícolas intensivos (Casierra-Posada et al., 2009; Narandžić et al., 2022). Esta influencia anatómica también permite que el portainjerto se adapte a condiciones ambientales adversas, como suelos con limitaciones hídricas o de nutrientes, al modificar la arquitectura de su sistema radical (Narandžić et al., 2022). En conjunto, la anatomía del portainjerto es un factor clave que afecta la salud y la productividad de la planta, aunque su impacto también está ligado a otros factores como las condiciones ambientales y el manejo del cultivo.

2.4. Sistema radical en aguacate y su importancia

El portainjerto cumple un papel crucial en el desarrollo del sistema radical, ya que influye en su arquitectura, la absorción de nutrientes y las interacciones microbianas. Además de determinar las características físicas de las raíces, también modula la respuesta de la planta frente a tensiones ambientales, afectando directamente su crecimiento y productividad. Según Cichi & Gheorghiu (2022), el crecimiento del sistema radical depende tanto de las características genéticas del portainjerto como de factores ambientales, como las condiciones climáticas y las propiedades del suelo. En el caso del aguacate, Alberti et al. (2018) demostraron que el injerto tiene un impacto significativo en el desarrollo de las raíces principales y laterales del portainjerto, lo que mejora la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes, reduciendo el tiempo necesario para la producción de plantas en vivero.

Asimismo, los portainjertos pueden aumentar la resiliencia de la planta frente al estrés abiótico, como la salinidad y la sequía, lo que les permite adaptarse mejor a condiciones subóptimas (Kolekar, 2024). Un estudio sobre portainjertos de macadamia destacó que las características iniciales de enraizamiento son determinantes para predecir el éxito del injerto, subrayando la importancia del desarrollo radical en las etapas iniciales de crecimiento (Alam et al., 2018). La arquitectura de raíces del portainjerto es fundamental en condiciones de estrés ambiental. Diferencias en grosor y densidad de raíces permiten mejorar la captación de agua y nutrientes en suelos limitantes, y favorecen la tolerancia a sequía o a salinidad (Narandžić et al., 2022).

En aguacate, por ejemplo, el portainjerto Duke mostró resistencia parcial a la podredumbre de la raíz por *Phytophthora* (Zentmyer, et al., 1963), mientras que portainjertos clonales como Dusa® presentan respuestas inmunes más sostenidas ante el patógeno (Fick et al., 2022). También se han documentado diferencias claras en la respuesta fisiológica del cultivar Hass bajo condiciones de salinidad o sequía dependiendo del portainjerto utilizado (Salazar-García et al., 2016).

2.5. Literatura citada

- Alam, M. M., Wilkie, J. and Topp, B. L. (2018). Early growth and graft success in macadamia seedling and cutting rootstocks. *Acta Horticulturae*, 1205, 637-644.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1205.79>
- Álvarez López, H. (2020). *Manual de injertación en frutales, contribución en fisiología vegetal (Material de enseñanza universitaria)*. Universidad Nacional de Jaén. <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/389>
- Alberti, M. F., Amaral Brogio, B. D., Rodrigues da Silva, S., Cantuarias-Avilés, T., & Fassio, C. (2018). Avances en la propagación de aguacate. *Revista Brasileira de Fruticultura* 40(6), Article e-782.
<https://doi.org/10.1590/0100-29452018782>
- Avilán, L., Leal, F., & Bautista, D. (1992). Manual de fruticultura, principios y manejo de la producción. *Editorial América*. 2da. Edición. Caracas, Venezuela. 666-776.

- Barrientos-Priego, A., Borys, M. W., & Barrientos-Perez, F. (1986). Rooting of avocado cuttings (*Persea americana* Mill.) cvs. Fuerte and Colín V-33. *California Avocado Society Yearbook*, 70, 157-163.
- Barrientos Pérez, F., & Barrientos Priego, A. F. (1996). Correlaciones entre algunas características de plántulas de aguacate de 'Colín V-33' y sus efectos enanizantes como portainjertos. *Revista Chapingo Horticultura* 5, 95-98.
- Brokaw, W. H. 1975. Root rot resistant avocado clonal rootstocks. *Plant Propagator* 21(4), 7-8.
- Ben-Ya'acov, A. (1987). Avocado rootstock-scion relationships. *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 10, 30-32.
- Ben-Ya'acov, A., Michelson, E., & Sela, I. (1995). Avocado rootstocks. *Horticultural Reviews*, 17, 381-429.
- Casierra-Posada, F., & Guzmán, J. A. (2009). Efecto del portainjerto y del injerto intermedio sobre la calidad de fruta en mango (*Mangifera indica* L.). *Agronomía Colombiana*, 27(3), 367-374.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-99652009000300010&script=sci_arttext
- Cichi, M., & Gheorghiu, N. (2022). Aspects regarding variety/rootstock relationship in some species of fruit species. *Annals of the University of Craiova-Agriculture Montanology Cadastre Series*, 52(1), 73-78.
<https://doi.org/10.52846/aamc.v52i1.1316>
- Costa, J. M., Heuvelink, E. P., & Van de Pol, P. (2017). Propagation by cuttings. In B. D. Roitberg (Ed.), *Reference module in life sciences* Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.05091-3>
- Díaz-Sala, C. (2020). A perspective on adventitious root formation in tree species. *Plants*, 9(12), Article 1789.
<https://doi.org/10.3390/plants9121789>
- Ernst, A. A., & Holtzhausen, L. C. (1978). New promising technique for rooting difficult-to-root avocado (*Persea americana* Mill.) cuttings. *Citrus and Subtropical Fruit Journal*, 532, 6-10.
- Fassio, C., Castro, M., & Cruz, R. (2021). Factores que afectan la unión injerto/portainjerto en la propagación clonal de *Persea americana* Mill. In Barrientos-Priego, A. F. (Ed.), *Memorias del VI Congreso Latinoamericano del Aguacate* (pp. 7-11; 9 - 12 de noviembre 2021, La Antigua, Guatemala). Asociación Guatemalteca de Exportadores AGEXPORT.
- Fick, A., Swart, V., Backer, R., Bombarely, A., Engelbrecht, J., & Van den Berg, N. (2022). Partially resistant avocado rootstock Dusa® shows prolonged upregulation of nucleotide binding-leucine rich repeat genes

- in response to *Phytophthora cinnamomi* infection. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 793644. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.793644>
- Foster, T., Kirk, C., & Grossman, J. (2015). Loci controlling apple dwarfing rootstocks and interactions with scion vigour. *Tree Genetics & Genomes*, 11, Article 119. <https://doi.org/10.1007/s11295-015-0939-5>
- Frolich, E., & Platt, R. (1972). Use of the etiolation technique in rooting avocado cuttings. *California Avocado Society YearBook* 55, 97-109.
- Gautier, A. T., Chambaud, C., Brocard, L., Ollat, N., Gambetta, G. A., Delrot, S., & Cookson, S. J. (2019). Merging genotypes: graft union formation and scion–rootstock interactions. *Journal of Experimental Botany*, 70(3), 747-755. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery422>.
- Habibi, F., Liu, T., Folta, K., & Sarkhosh, A. (2022). Physiological, biochemical, and molecular aspects of grafting in fruit trees. *Horticulture Research*, 9, Article uhac032. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac032>
- Hayat, F., Iqbal, S., Coulibaly, D., Razzaq, M. K., Nawaz, M. A., Jiang, W., Shi, T., & Gao, Z. (2021). An insight into dwarfing mechanism: contribution of scion-rootstock interactions toward fruit crop improvement. *Fruit Research* 1(3), 1-11. <https://doi.org/10.48130/FruRes-2021-0003>
- Kasana, M. I., Khan, R. I., Khan, N. U., Noman, M., Ali, S., Mumtaz, S., & Qamar, M. (2024). Impact of grafting techniques on vegetative growth of different avocado cultivars. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 37(1), 39-47. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2024/37.1.39.47>
- Kapazoglou, A., Tani, E., Avramidou, E. V., Abraham, E. M., Gerakari, M., Megariti, S., Doupis, G., and Doulis, A. G. (2021) Epigenetic changes and transcriptional reprogramming upon woody plant grafting for crop sustainability in a changing environment. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 613004. doi: 10.3389/fpls.2020.613004
- Kohne, J. S. (1992). Field evaluation of ‘Hass’ avocado grown on Duke 7, G6 and G755C Rootstocks. In *Proceedings of Second World Avocado Congress* (pp. 301-303). University of California Riverside.
- Kolekar, S. N. (2024). Rootstocks for tropical and sub- tropical fruit crops. *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences*, 3, 214-234. <https://www.doi.org/10.58532/V3BCAG16P6CH2>
- Liang, X., Xu, X., Liu, Y., Wu, C., Wu, M., & Chen, Q. (2025). Identification of mango cultivars resistance against red spider mite: impact of climate elements on resistance performance. *Agronomy* 15(2). Article 324. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020324>
- López-Galé, Y., Murcia-Riaño, N., Romero-Barrera, Y., & Martínez, M. F. (2022). Morphological characterization of seed-donor creole avocado

- trees from three areas in Colombia. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 28(2), 93-108. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2021.06.010>
- Martínez-Alcántara, B., Rodríguez-Gamir, J., Martínez-Cuenca, M. R., Iglesias, D. J., Primo-Millo, E., & Forner-Giner, M. A. (2013). Relationship between hydraulic conductance and citrus dwarfing by the Flying Dragon rootstock (*Poncirus trifoliata* L. Raf. var. monstrosa). *Trees*, 27(3), 629-638. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0821-8>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.07.013>
- Moreno-Pérez, A., Barceló, A., Pliego, C., & Martínez-Ferri, E. (2024). Water relations and physiological response to water deficit of 'Hass' avocado grafted on two rootstocks tolerant to *R. necatrix*. *Agronomy*, 14(9), Article 1959. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091959>
- Narandžić, T., & Ljubojević, M. (2022). Size-controlling cherry rootstock selection based on root anatomical characteristics. *Horticulturae*, 8(7), Article 615. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070615>
- Pugalendhi, L., Bharathi, S., Tamil Selvi, N. A., & Nandhini Devi, H. U. (2022). Grafting of tomato with interspecific solanaceous rootstocks: an approach to anatomical and histological findings. *Recent Progress in Plant and Soil Research*, 5, 37-46. <https://doi.org/10.9734/bpi/rppsr/v5/2185C>
- Rasool, A., Mansoor, S., Bhat, K. M., Hassan, G. I., Baba, T. R., Alyemeni, M. N., Alsahli, A. A., El-Serehy, H. A., Paray, B. A., & Ahmad, P. (2020). Mechanisms underlying graft union formation and rootstock scion interaction in horticultural plants. *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 590847. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590847>
- Ricci, A., Polverini, E., Bruno, S., Dramis, L., Ceresini, D., Scarano, A. & Díaz-Sala, C. (2023). New insights into the enhancement of adventitious root formation using N,N'-Bis(2,3-methylenedioxyphenyl)urea. *Plants*, 12(20), Article 3610. <https://doi.org/10.3390/plants12203610>
- Rondon, T., Guzmán-Hernández, M., Torres-Madronero, M.C., Casamitjana, M., Cano, L., Galeano, J., & Goez, M. (2024). Comparative analysis of water stress regimes in avocado plants during the early development stage. *Plants*, 13, Article 2660. <https://doi.org/10.3390/plants13182660>
- Salazar-García, S., Medina-Torres, R., Ibarra-Estrada, M. E., & González-Valdivia, J. (2016). Influence of clonal rootstocks on leaf nutrient concentrations in 'Hass' avocado grown without irrigation. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 22(3), 161-174. doi: 10.5154/r.rchsh.2015.06.013

- Sánchez Colín, S., Mijares Oviedo, P., López-López, L., & Barrientos-Priego, A. F. (1998). *Historia del aguacate en México*. Memoria Fundación Salvador Sánchez Colón-CICTAMEX (pp. 171-187). Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S.C.,
- Sánchez-González, E. I., Gutiérrez-Soto, J. G., Olivares-Sáenz, E., Gutiérrez-Díez, A., Barrientos-Priego, A. F., & Ochoa-Ascencio, S. (2019). Screening progenies of Mexican race avocado genotypes for resistance to *Phytophthora cinnamomi* Rands. *HortScience*, 54(5), 809-813. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13552-18>
- Santos, A. d. S., Gomes, F. A. L., Silva, L. d. S., Neto, V. B. d. P., Silva, M. T. L., Silva, A. C. R. d., & Cavalcante, Í. H. L. 2024. Rootstock affects phytotechnical attributes, gas exchange, and carbohydrate accumulation in mango scion. *Folia Horticulturae*, 36(3), 337-350. <https://doi.org/10.2478/fhort-2024-0019>
- Shen, S., Xu, G., Li, D., Yang, S., Jin, G., Liu, S., Roy Clements, D., Chen, A., Zhang, F., Wen, L., Tao, Q., Zhang, S., & Yang, J. (2021). Adventitious roots support population expansion of the invasive plant *Mikania micrantha* Kunth. *Physiologia Plantarum*, 173(3), 911-919. <https://doi.org/10.1111/ppl.13487>
- Téliz, D. (2000). *El aguacate y su manejo integrado*. Ed. Mundi-Prensa.
- Thorp, G., & Hallett, I. (1999). Searching for “paradise” in the avocado germplasm. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 29-35.
- Van Hooijdonk, B., Woolley, D., Warrington, I., & Tustin, S. (2011). Rootstocks modify scion architecture, endogenous hormones, and root growth of newly grafted ‘Royal Gala’ apple trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 136(2), 93-102. <https://doi.org/10.21273/JASHS.136.2.93>
- Verma, P., Sharma, NC., Sharma, DP., Kumar, P., Chand, K., Thankur, H. (2024). Dwarfism mechanism in *Malus* clonal rootstocks. *Planta*, 260(6), Article 133. <https://doi.org/10.1007/s00425-024-04561-5>
- Yahia, E. M. (2023). Advances in pre-harvest management of avocado. *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*, 135-204.
- Zentmyer, G. A., Thorn, W. A., & Burns, R. M. (1963). The Duke Avocado. *California Avocado Society Yearbook* 47, 28-36.
- Zhou, Z., Yuan, Y., Wang, K., Wang, H., Huang, J., Yu, H., & Cui, X. (2022). Rootstock-scion interactions affect fruit flavor in grafted tomato. *Horticultural Plant Journal*, 8(4), 499-510. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2022.01.001>
- Zhou, Y., & Underhill, S. J. R. (2020). Expression of gibberellin metabolism genes and signalling components in dwarf phenotype of breadfruit

(*Artocarpus altilis*) plants growing on marang (*Artocarpus odoratissimus*) rootstocks. *Plants*, 9(5), Article 634.
<https://doi.org/10.3390/plants9050634>

CAPÍTULO 3. SISTEMA RADICAL DE CINCO GENOTIPOS CLONALES DE AGUACATE

Root Systems of Five Clonal Avocado Genotypes³

Nancy Elena Gonzalez-Florez ¹, Alejandro Facundo Barrientos-Priego ^{1,*}, Eduardo Campos-Rojas ¹,
María Teresa Beryl Colinas y León ¹ and Prometeo Sánchez García ²

¹ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera, México-Texcoco, Texcoco 56230, MX, Mexico; nancyegonzalezf@gmail.com (N.E.G.-F.); ecamposr@chapingo.mx (E.C.-R.); mcolinasy@chapingo.mx (M.T.B.C.y.L.)

² Especialidad de Edafología, Colegio de Posgraduados, Km. 36.5 Carretera, México-Texcoco, Texcoco 56264, MX, Mexico; sanchegarciaprometeo@gmail.com

* Correspondence: abarrientosp@chapingo.mx; Tel.: +52-5959521616

Abstract: The root system of clonal rootstocks has been poorly studied, despite its crucial importance. Roots not only provide support and nutrition to the plant but also contribute to tolerance to pests, diseases and environmental stresses, in addition to optimizing yields. Although the initial cost of clonal rootstocks is higher, the investment is offset by the reduction in phytosanitary treatments, greater longevity of the trees and a lower mortality rate. The aim of this research was to quantify the root system growth of five clonally propagated dwarf and normal avocado genotypes evaluated in rhizotrons, with the perspective of identifying distinctive characteristics suitable for their possible use in container culture. The avocado clonal plants to be evaluated were placed in rhizotrons and evaluated for six months, where 35 growth variables were evaluated with the aid of a root analyzer program. A randomized complete block design with five treatments (genotypes) and three replications was used under greenhouse conditions. Analysis of variance, variable purge and multivariate analysis were performed. It was found that ‘Duke 7’ and ‘San Martín’ were statistically different for most of variables, with ‘San Martín’ showing less root growth and ‘Duke 7’ showing remarkable lateral growth. The adventitious root system’s growth depends on the genotype, and the use of rhizotrons allows its study, which proved to be a useful methodology for this type of evaluation since it allows the visualization and adequate quantification of root growth. Genotypes with less root growth may be suitable for use in container culture, and roots with extensive lateral growth may be useful in shallow soils.

Keywords: *Persea americana* Mill.; dwarf avocado; clonal rootstocks; root growth



Academic Editor: Elena Baldi

Received: 27 December 2024

Revised: 6 February 2025

Accepted: 12 February 2025

Published: 21 February 2025

Citation: Gonzalez-Florez, N.E.; Barrientos-Priego, A.F.; Campos-Rojas, E.; Colinas y León, M.T.B.; Sánchez García, P. Root Systems of Five Clonal Avocado Genotypes. *Horticulturae* **2025**, *11*, 232. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030232>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Most commercial avocado plantations use rootstocks originating from seeds [1]. Although ‘criollo’ seedling rootstocks offer high adaptability, they have considerable genetic variability, which does not guarantee stable behavior in the field [2]. This situation went unnoticed by the industry until a few years ago, when plantations were established in good quality soils. However, market and growing conditions have changed, moving the crop to areas with edaphic limitations [1], which mainly affect the young roots responsible for nutrient uptake and growth [3]. Therefore, the development of new avocado rootstocks is of great relevance.

There are several breeding programs for avocados (*Persea americana* Mill.) focused on developing new cultivars and rootstocks to increase productivity and address soil stress

<https://doi.org/10.3390/horticulturae11030232>

problems [2]. Other programs focus on incorporating disease resistance and other desirable traits [4]. However, it is not always possible to bring together all desired traits in a single rootstock [5]. Recently, there has been an increase in research on avocado rootstocks, an area previously explored little due to the complexity and time required for this type of study [6], where clonal propagation is vital to maintain the relevant characteristics of the rootstock.

The current trend in fruit tree propagation is rooted rootstocks, which eliminate genetic variability and reduce the production onset [7]. Only rootstocks obtained by asexual methods are genetically identical to the mother plant [8]. Selecting and obtaining these clonal avocado rootstocks is one of the greatest challenges in modern fruit growing, since their propagation is a long and costly process [4,9]. According to Barrientos-Priego et al. [10], the ideal avocado tree should have a maximum height of 5 m, which would facilitate phytosanitary control, harvesting, pruning and foliar fertilization. This type of tree would allow the establishment of higher-density plantations, increasing the production per unit area. An alternative for avocado cultivation is establishment in containers, which has been used in some studies on water use and shown that it is possible to obtain production under such conditions [11]. In Chile, it has been proposed as an alternative in greenhouse systems, where it could help mitigate the impact of climate change and reduce its water footprint by having a controlled system [12]. In these alternative systems, dwarfing rootstocks can play an important role.

In the case of avocados, there are some dwarf genotypes which possibly have dwarfing characteristics for their rootstocks. In other fruit trees, such as apples, specific genes have been located in rootstocks which contribute to the tree by reducing its size when grafted with normal-growing varieties [13]. In the case of avocados, these genes have not been studied, and it is also necessary to evaluate them when using them as rootstocks, in addition to studying their root systems.

The root system of clonal avocado trees is shallow, with a greater number of fine roots and a greater length density [14]. Several authors have suggested that the size and volume of the root system are important criteria for estimating plant quality and predicting plant performance in the field after transplanting. Plants with more developed root systems overcome transplanting stress better, show higher growth potential and improved water and nutrient uptake [15].

Roots, which are responsible for anchoring and mechanically supporting the aerial part of a plant in addition to absorbing water and nutrients, are a little-studied organ despite their importance [16]. It is essential to know the quantity and distribution of roots in the soil profile [17]. Furthermore, characterizing roots according to their branching order and anatomy is a useful approach for identifying functional differences within and between root systems [14], because these systems vary widely in extent and distribution in the soil profile [17].

Techniques such as using rhizotrons make it possible to observe root growth in situ and obtain a realistic picture of its distribution and intensity within the rhizosphere [18]. Rhizotrons are devices which allow studying the root systems of plants as they are designed with two glass sides, allowing observation of the growth and development of the root system from a noninvasive and non-destructive perspective. However, there is little research describing the variation in root architecture of fruit crops [19]. Due to the complexity of the study of roots in fruit trees, this topic has not been sufficiently investigated. This study, which used the rhizotron as a tool, aimed to generate information on the root growth of dwarf genotype rootstocks. This could allow a better understanding of root system conformation and facilitate their possible use as rootstocks based on these characteristics.

2. Materials and Methods

This research was carried out in a greenhouse of the Department of Phytotechnology at the Experimental Field of the Universidad Autónoma Chapingo, located in Chapingo, State of Mexico.

2.1. Plant Material

Five avocado clonal genotypes were selected for their dwarf growth habits and compared to a normal growth genotype (control) used as the world standard (Table 1).

Table 1. Avocado genotypes studied and their root system characteristics.

Genotype	Origin and Race	Characteristic
‘Duke 7’	California, USA. ‘Duke’ seedling, Mexican race.	Normal growth with medium-length internodes, tall size tree.
‘San Martín’	Tezuitlán, Puebla. Mexico. Mexican race seedling.	Dwarf growth with rather short internodes, extremely small tree.
‘Colín V-33’	Ixtapan de la Sal, Estado de México, Mexico. ‘Fuerte’ seedling, hybrid Mexican-Guatemalan race.	Dwarf growth, medium-length internodes, lateral extensive branch growth, loss of apical dominance, small tree.
‘Misterioso’	Coatepec Harinas, Estado de México, Mexico. ‘Frazer’ seedling, hybrid Mexican-Guatemalan race.	Dwarf growth with rather short internodes, extremely small tree.
‘Fundación II’	Coatepec Harinas, Estado de México, Mexico. ‘Hass’ seedling, hybrid Mexican-Guatemalan race.	Dwarf growth, medium-length internodes, lateral extensive branch growth, loss of apical dominance, small tree.

The cloning method used to obtain the plants was based on the work of Frolich and Platt [20], which is used worldwide to clone avocado rootstocks. The procedure consisted of producing an avocado plant from seed and, when it reached the appropriate diameter, a simple cleft grafting of the rootstock to the root. After complete union of the graft, the plants were placed in a dark chamber at 30 °C to obtain etiolated shoots from the grafts. When these reached a length of approximately 15–20 cm, the plants were removed from the dark chamber and transferred to an illuminated greenhouse. At the base of the etiolated shoot, potassium salt of indole-3-butyric acid (Sigma-Aldrich; San Luis, MO, USA) was applied at 7000 mg L^{−1} at a pH of 7 after placing a container at the base of the shoot and using coconut peat (Hydro Enironment S.A. de C.V.; Tlanepantla, Mexico) as a rooting medium.

2.2. Experimental Establishment

Based on previous studies carried out on the root system of peach seedlings using rhizotrons by Lesmes-Vesga et al. [19], it was decided to use this method to evaluate the root growth of the clonal avocado rootstocks. The rhizotron was 40 cm × 40 cm × 2.5 cm in length and had two transparent glass plates (40 cm × 40 cm in length) joined on both sides by a three-sided wooden frame with a perforated bottom to allow water filtration. The rhizotrons were filled with river sand (4 L), and the clonal plants were transplanted into them, corresponding to each treatment. Both sides of the rhizotron were covered with black and white bicolor polyethylene (Agripolyane – Tecnologías Agrícola del Centro S.A. de C.V., Tulancingo de Bravo, Mexico) with the white side facing out to avoid light and keep the roots in dark conditions. The experiment was conducted under greenhouse conditions

without temperature control, with an average temperature of 17 °C and a relative humidity of 71.9%. A drip fertigation system was used with two emitters calibrated to deliver 4 L per hour each, with a watering frequency of two minutes every 24 h and, in winter, every 48 h throughout the experiment, as water requirements were lower in the latter period due to lower temperatures. The nutrient formula supplied in mg L⁻¹ was as follows: 59 (N), 11 (P), 96 (K), 63 (Ca), 17 (Mg), 39 (Fe), 0.025 (Cu), 0.5 (Mn), 0.05 (Zn) and 0.5 (0.5).

2.3. Root System Monitoring

Root systems were photographed in the rhizotrons from each side of the glass windows once every two weeks for six months to assure good time for root growth, and graphs were created to visualize the root behavior. After this period, the roots were extracted for measurement by removing one of the rhizotron crystals. A nail board was used to extract each plant's root system to maintain the spatial distribution of the roots. The nail board consisted of an acrylic panel with 2.5 cm-long nails separated by 2.5 cm × 2.5 cm in length, and the substrate was separated from the roots inserted into the nail board by gently spraying water. Once the root systems were extracted from the rhizotrons, photographs were taken.

2.4. Image Analysis and Measurement Program

From the digital photographs taken every two weeks, the depth and width reached by the complete root system were measured, and the depth/width ratio was estimated with the images, which were processed with ImageJ version 1.48v software [21]. These two variables were also quantified for the bare root in order to have data in this condition.

A search of available root system analysis software was conducted, and at least 12 programs were explored, finding that RhizoVision Explorer version 2.0.3 [22] was suitable, easy to use and free to use. Digital photographs obtained at the end of the experiment (bare root system) were analyzed with the root image analysis software RhizoVision Explorer. By default, the software provides data for 35 variables which are used for the statistical analysis as variables (Table 2).

Table 2. Root variables evaluated in cloned avocado genotypes according to RhizoVision Explorer software. More details of each variable can be found in the manual (<https://www.rhizovision.com/manual>; accessed on 17 February 2025) or in the work of Seethepalli and York (2020) [22].

	Abbreviation	Variable
1	MinNR	Median Number of Roots
2	MaxNR	Maximum Number of Roots
3	NRT	Number of Root Tips
4	TRL	Total Root Length (mm)
5	Depth	Depth (mm)
6	MW	Maximum Width (mm)
7	WDR	Width-to-Depth Ratio
8	NA	Network Area (mm ²)
9	CA	Convex Area (mm ²)
10	S	Solidity
11	LRA	Lower Root Area (mm ²)
12	AD	Average Diameter (mm)
13	MedD	Median Diameter (mm)
14	MaxD	Maximum Diameter (mm)
15	P	Perimeter (mm)
16	Vol	Volume (mm ³)
17	SA	Surface Area (mm ²)

Table 2. Cont.

Abbreviation		Variable
18	H	Holes
19	AH	Average Hole Size (mm ²)
20	ARO	Average Root Orientation
21	SAF	Shallow Angle Frequency
22	MAF	Medium Angle Frequency
23	SteepAF	Steep Angle Frequency
24–26	RLDR 1–3 layer	Root Length Diameter (mm) 27–
29	PADR 1–3 layer	Projected Area Diameter (mm ²)
30–32	SADR 1–3 layer	Surface Area Diameter (mm ²)
33–35	VDR 1–3 layer	Volume Diameter (mm ³)

2.5. Replications, Experimental Design and Statistical Analysis

The experiment design used was a randomized complete block according to the pressurized irrigation system, with five treatments and three replicates. The resulting data of the variables were compared between treatments with analysis of variance, standard error and Tukey's mean comparisons ($p \leq 0.05$) with SAS statistical software version 9.4 [23]. The variables in Table 2 were depurated according to López-Santiago et al. [24], as procedures were carried out to eliminate highly associated variables with no differences, assuring correct identification of the principal variables contribute to the distinctness of a multivariable analysis. Subsequently, a principal component analysis was performed, in addition to neighbor-joining clustering analysis and Manhattan distance analysis [25] with 10,000 resamples using the PAST 3.26 program [26]. This resampling (bootstrap) allowed us to have a better idea of the clusters formed and gave us a robust dendrogram with a high probability of occurrence.

3. Results

3.1. Follow-up of Complete Root System in Rhizotron

The root systems showed significant differences at the end of monitoring in the rhizotrons in terms of depth in the case of 'Colín V-33' and 'Fundación II' with respect to 'Misterioso' and 'San Martín' (Figure 1). 'San Martín' showed a notorious root system with less depth.

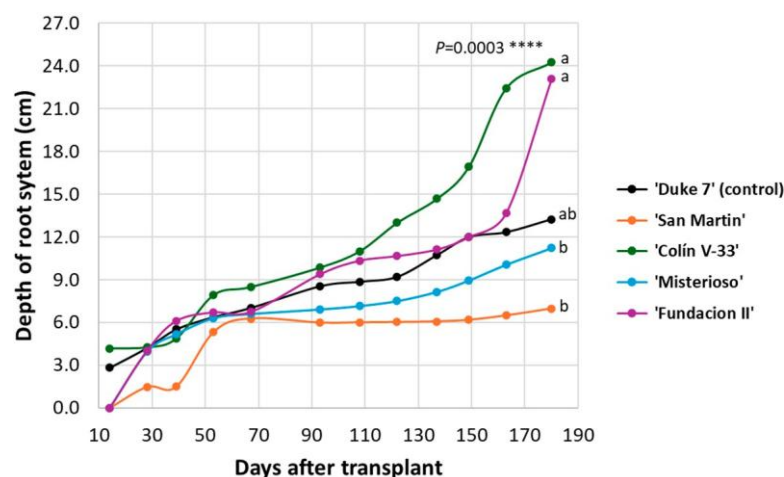


Figure 1. Depths of the adventitious root systems of avocado genotypes, obtained from the monitoring of rhizotrons using digital photographs. Letters for the last day indicate different values according to Tukey's test at $p \leq 0.05$. **** $p \leq 0.0001$ significance according to the variance analysis.

With respect to the final width (Figure 2), ‘San Martín’ showed the smallest width and was significantly different from ‘Fundación II’, ‘Duke 7’ and ‘Colín V-33’ but not significantly different from ‘Misterioso’.

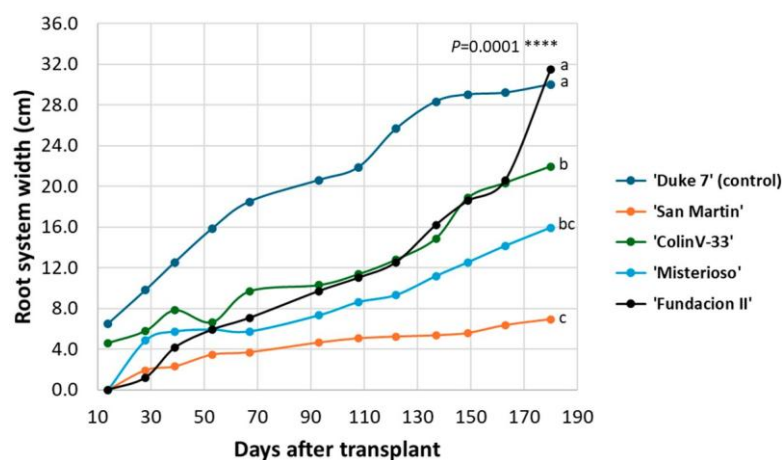


Figure 2. Widths of the adventitious root systems of avocado genotypes, obtained from monitoring rhizotrons using digital photographs. Letters for the last day indicate different values according to Tukey’s test at $p \leq 0.05$. **** $p \leq 0.0001$ significance according to the variance analysis.

The width of ‘Fundación II’ and ‘Duke 7’ had significant differences with ‘Colín V-33’ and ‘Misterioso’. For the depth/width ratio (Figure 3), significant differences were found only between ‘Colín V-33’ and ‘Duke 7’, showing a uniform ratio during all of the evaluation. It should be noted that monitoring in rhizotrons generates estimates of root system growth which may differ from the total root system, since not everything can be quantified.

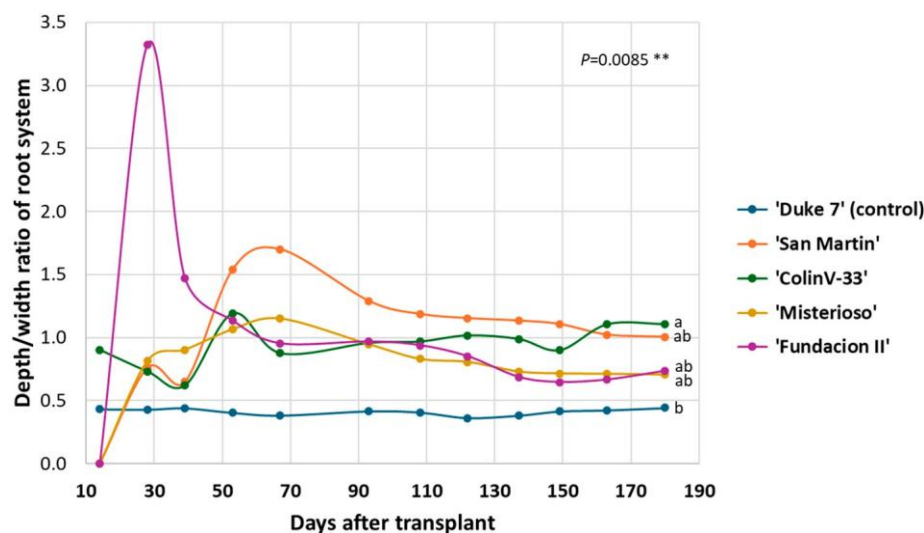


Figure 3. Depth/width ratios of the adventitious root systems of avocado genotypes, obtained from monitoring rhizotrons using digital photographs. Letters for the last day indicate different values according to Tukey’s test at $p \leq 0.05$. ** $p \leq 0.001$ significance according to the variance analysis.

3.2. Complete Root System Outside the Rhizotron

‘Colín V-33’ and ‘Fundación II’ showed the deepest root systems (Figure 4A), with no significant differences with ‘Duke 7’ and ‘Misterioso’. ‘San Martín’ had the lowest depth. The greatest width was found for ‘Duke 7’ (Figure 4B), showing significant differences with ‘San Martín’ and ‘Misterioso’.

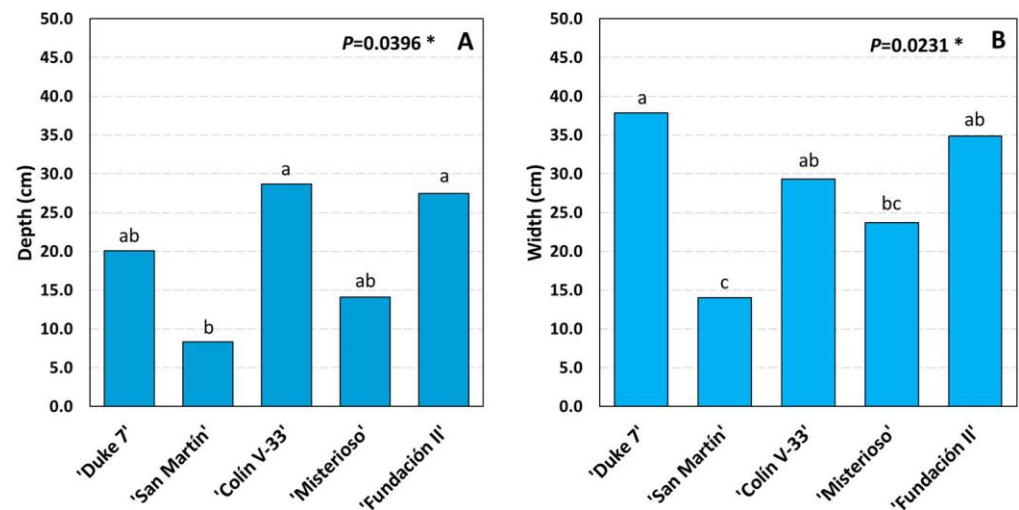


Figure 4. (A) Depths and (B) widths of the adventitious root systems of avocado genotypes, obtained after extraction of rhizotrons. Letters indicate different values according to Tukey's test at a $p \leq 0.05$. * $p \leq 0.01$ significance according to the variance analysis.

These differences can be seen visually in the corresponding photographs (Figure 5).



Figure 5. Adventitious root systems of avocado genotypes after removal from rhizotrons. Letters T and R represent treatment (genotype) and replicate, respectively. Scale = 30 cm.

The root systems showed significant differences at the end of monitoring in the rhizotrons in terms of volume (Figure 6); ‘San Martín’ and ‘Misterioso’ had the lowest volumes, which were significantly different from ‘Fundación II’ and ‘Duke 7’.

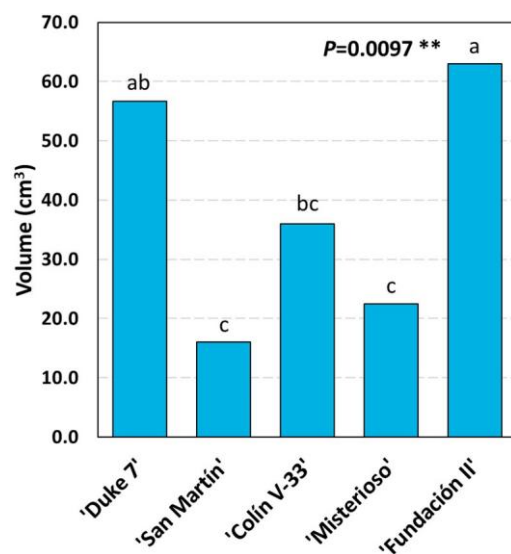


Figure 6. Volumes of the adventitious root systems of avocado genotypes obtained after extraction from rhizotrons. Letters indicate different values according to Tukey’s test at $p \leq 0.05$. ** $p \leq 0.001$ significance according to the variance analysis.

It should be noted that the two genotypes with short internodes and dwarfs, ‘San Martín’ and ‘Misterioso’, had smaller root systems with limited exploration in the substrate. While the dwarfs with extensive lateral growth had root systems with greater exploration in terms of depth, the control ‘Duke 7’ with normal growth had merely lateral growth and limited depth exploration. Those differences can be appreciated in Figure 5.

3.3. Main Variables of Root Growth Through Image Analysis

‘Duke 7’ and ‘Fundación II’ exhibited higher values for the maximum number of roots (Figure 7A), number of root tips (Figure 7B), total root length (Figure 7C) and root network area (Figure 7D), while ‘San Martín’ showed lower values for most of the variables. For the variable average root diameter, there were no significant statistical differences (Figure 7E).

3.4. Depuration and Principal Component Analysis (PCA) of Root Growth Variables

After variable depuration, the following variables were found: the maximum number of roots, root depth (mm), maximum root system width (mm), root network area (mm²), root system solidity, average root diameter (mm) and projected root diameter in layer 2 (mm). These were included in the PCA as well in the cluster analysis.

In the PCA, with the resulting variables after depuration, the first principal component explained 99.8% of the total variance (Table 3), and the values of the principal variables comprising these components were the root network area (mm²) and projected root diameter in the second layer (mm) for CP 1 and the projected root diameter in the second layer (mm), root network area (mm²) and root depth (mm) for CP 2 (Table 4).

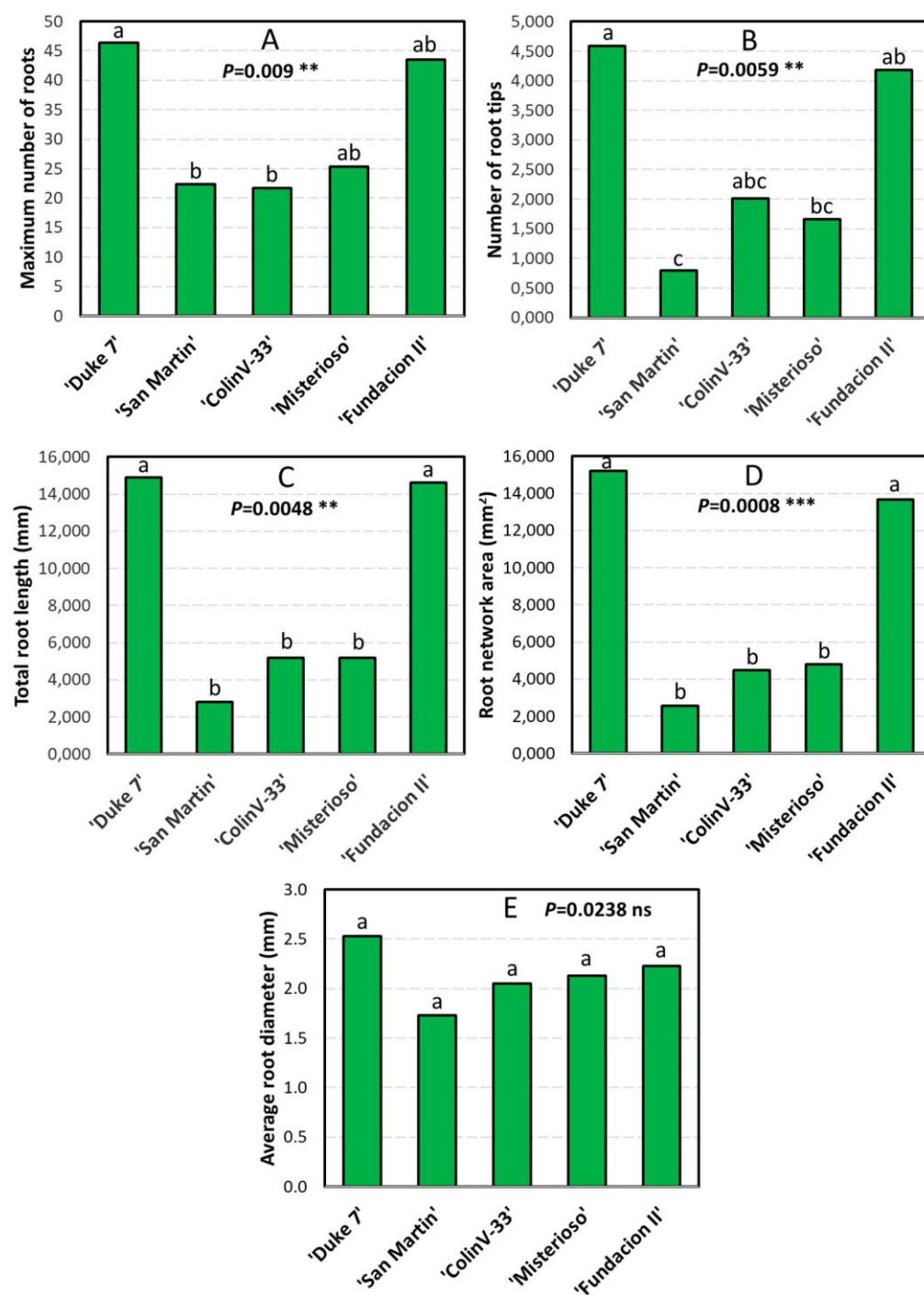


Figure 7. Morphological variables of the adventitious root system of avocado genotypes after removal from the rhizotrons: (A) maximum number of roots, (B) number of root tips, (C) total root length, (D) root network area and (E) average root diameter. Letters indicate different values according to Tukey's test at a $p \leq 0.05$. ns: not significant, $^{**} p \leq 0.001$, $^{***} p \leq 0.0001$ significance according to the variance analysis.

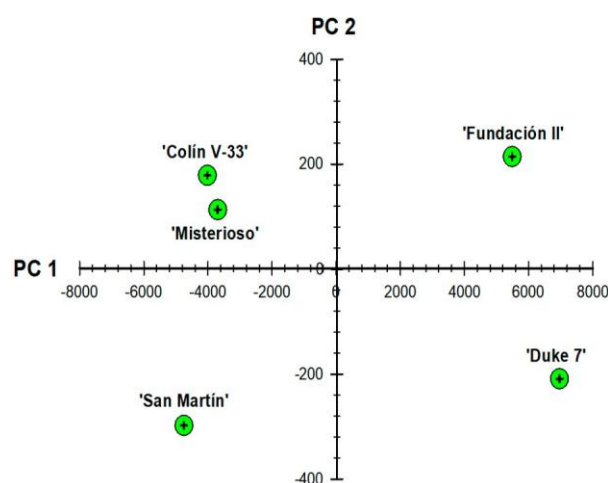
Table 3. Eigen values and accumulated variance of principal component analysis of avocado genotypes adventitious root system variables. Obtained after rhizotron extraction and image analysis.

Principal Component	Eigen Value	Variance (%)
1	3.27×10^7	99.821
2	55,768.3	0.17004
3	1877.25	0.0057237
4	930.56	0.0028373

Table 4. Eigen values of the variables which formed the first two principal components of adventitious root systems of avocado genotypes. Obtained after rhizotron extraction and image analysis.

Variable	PC 1	PC 2
Maximum number of roots	0.0021239	−0.0002322
Root depth (mm)	0.0046799	0.20023
Maximum broadness of root system (mm)	0.013135	0.039346
Area of root network (mm ²)	0.96847	−0.24493
Solidity of root system	1.58×10^{-6}	−0.0003678
Average diameter of roots (mm)	-3.64×10^{-7}	−0.0019959
Projected diameter of roots in the second layer (mm)	0.24873	0.94782

In the two-dimensional projection of avocado genotypes for the first two principal components (Figure 8), four groups were defined. The first group consisted of ‘Fundación II’ in the positive plane, ‘San Martín’ in the negative plane, ‘Duke 7’ in the positive-negative plane and ‘Colín V-33’ and ‘Misterioso’ in the negative-positive plane.

**Figure 8.** Dispersion of avocado genotypes in the first factorial plane of the first two functions of the principal component analysis (PC), derived from adventitious root system characteristics. PC 1: Root network area (mm²) and root diameter in the second layer (mm). PC 2: Projected root diameter in the second layer (mm), root network area (mm²) and root depth (mm).

The clustering analysis showed a remarkable similarity between the genotypes ‘Duke 7’ and ‘Fundación II’, which clustered closer together and further away from the rest of the genotypes (Figure 9). In contrast, ‘San Martín’ was located in a basal branching, indicating a greater distance from the others. This result agrees with and reinforces the findings in the principal component analysis, since most of the branches had high bootstrap values, making the analysis more robust.

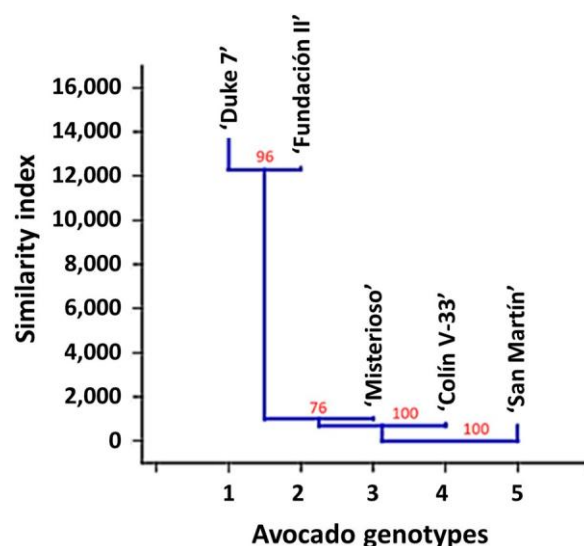


Figure 9. Clustering of avocado genotypes with the neighbor-joining method and Manhattan distance with 10,000 resamples, derived from adventitious root system characteristics. The values in the branches are the probability as a percentage of occurrence according to the bootstrap.

Root network area and projected root diameter in the second layer of 'Duke 7' and 'Fundación II' were higher and different from the rest of the genotypes (Table 4), and in terms of root depth, 'Colín V-33' and 'Fundación II' showed the highest values and were not different from 'Duke 7' and 'Misterioso', while 'San Martín' was the one with the lowest value.

4. Discussion

The observed root system was generally shallow and extended at the time of measurement, which is in agreement with Castro et al. [16], who noted that avocado roots are shallow, lack root hairs and extend into the canopy projection zone. In contrast to what has been found in peach x almond backcrosses, in which their root system develops greater depth, which facilitates exploration of the sandy soil and allows access to water and nutrient availability [27], key aspects for an efficient root system. It has been indicated that varieties of fruit species with deep roots showed better growth and higher productivity [28]. The roots of the dwarf 'Colín V-33' and 'Fundación II' were deeper and highly contrasting with the control 'Duke 7', which showed contrasting shallow roots. Thus, the performance of these genotypes should be evaluated in field conditions to assure their root exploration distribution in the soil. However, avocado is characterized by having a root system which extends into the first 0.60 m of soil, although they can reach depths greater than 1.5 m [29]. Lynch [30], in this respect, pointed out that shallow roots are beneficial in humid climates, where they can effectively capture nutrients from the surface soil, as can be the case for 'Duke 7', which presented a shallow but extensive root system.

As for the average root diameter, no differences were observed, which contrasted with the findings of Atkinson and Wilson [31], who stated that as the root system matures, it develops roots of different ages and diameters, which improves its capacity to absorb water and nutrients. However, it should be emphasized that the growth of the root system was initial and determined by the age of the plants evaluated in the present study.

The width of the root system and its extension into the upper soil layers has been highlighted in sweet orange 'Pera' and can be effective, as long as the roots are horizontally extensive, which supports the vigor and yield of plants in rainfed conditions [32], a behavior which 'Duke 7' exhibited in our study, compared with other plants.

The adventitious root systems of the genotypes evaluated had contrasting differences, which has been observed in other species with respect to the architecture of the root systems, such as for peaches [19], and this influences nutrient absorption and mechanical stability [32]. This variability observed in avocado plants can be exploited to select types with greater root exploration and may be crucial for adaptation to specific soil conditions, which should be studied more extensively. It has been found that the adaptability of root systems to different soil types, such as in plantations of *Cupressus funebris*, underlines the need for a flexible approach in rootstock selection and management to optimize performance [33]. Similarly, in other species, it was highlighted that the remarkable variability in more complex root architecture traits suggests that it could contribute to their adaptability and productivity in different environments [34]. Containerized avocado cultivation opens up the possibility as an alternative for a production system under protected conditions to mitigate the impacts of climate change and the impact of the water footprint [12]. For this, selected rootstocks will be needed, perhaps one with the characteristics of limited root growth and exploration (as was found in our study), such as ‘San Martín’ and ‘Misterioso’, which are dwarf genotypes with short internodes, but this needs to be studied in the future. On the other hand, Fassio et al. [6] noted that in clonal avocado trees, the absence of a taproot causes the root mass to develop well, with the main roots extending outward and downward, which are crucial for tree stability. Such a root mass was found for ‘Duke 7’ and ‘Misterioso’, with more roots and therefore more root tips, which may mean greater nutrient and water uptake as well as perhaps more synthesis of hormones such as auxins [35] and gibberellins [36]. This could also perhaps lead to better adaptation to rich soils, where minerals are available to be absorbed more efficiently.

It has been found that according to the method of rootstock propagation in citrus, the root architecture significantly influences the performance of grafted varieties [37]. In genetic studies on grapevine rootstocks, several quantitative trait loci (QTLs) associated with root characteristics have been identified, suggesting that certain genotypes could be selected and improved to optimize the root architecture and, consequently, increase productivity when grafted [38]. Since we found considerable variability in the avocados we studied, it is necessary to follow up on their grafted behavior and whether this difference in root systems is reflected by a grafted plant.

The plant root volume showed a positive correlation with the stem length and diameter as well as with the total biomass, and initial differences in plant size were maintained over time [15]. In this respect, both ‘Duke 7’ and ‘Fundación II’ showed larger root volumes, while the rest of the genotypes had smaller volumes. It has been suggested that root systems with robust root architectures are fundamental to maintaining productivity in trees [39], which can be the case for the two genotypes mentioned.

It has been highlighted that the main benefit of using clonal rootstocks in avocado lies in the superiority of producing roots and their growth, which positively impacts plant performance in the field [5]. In addition, studies have shown that ‘Duke 7’ clones have shown medium resistance to *Phytophthora cinnamomi*, higher productivity and fruit quality, as well as better resistance to edaphoclimatic stress [5]. The behavior of the root system of fruit trees evolves significantly over time, being characterized by distinct growth stages and variable architectures which adapt to conditions.

Principal component analysis allowed the identification of root system characteristics, which helped to discriminate between genotypes, as has been noted for other species [40]. This analysis indicated that the root network area and projected root diameter were in the second layer, with the former denoting a greater root system complexity and the latter regarding the distribution of the root system. The classification of the genotypes according to these main characteristics also coincided with the cluster analysis, which indicates the

usefulness of this type of multivariate analysis for selecting genotypes for their root system features and trying to determine their potential according to soil conditions [41] and soil types, as stated for other crops [42].

The relationship between the root system architecture and productivity in fruit trees is multifaceted and involves genetic, environmental and biological factors. While robust root systems generally correlate with higher productivity, specific interactions can vary significantly across genotypes and environmental conditions. Understanding these behaviors is essential for choosing a specific rootstock and succeeding in fruit tree cultivation.

The findings reinforce the importance of strategic selection based not only on immediate variability but also the potential for adaptation to different soil and climatic conditions, which is key in regions where efficient management of natural resources is a priority and in the context of a changing climate.

5. Conclusions

This study of root growth provided details on the architecture of the adventitious root systems of the avocado genotypes studied, where ‘Duke 7’ and ‘San Martín’ contrasted strongly for most of the variables studied and ‘Fundación II’ was similar to ‘Duke 7’, although with rather particular differences. Due to its root characteristics, ‘Duke 7’ can be suggested for use in shallow soils due to its strong lateral growth. The dwarf short internode genotypes ‘San Martín’ and ‘Misterioso’ could possibly be used for container cultivation due to their limited root systems. The dwarf genotypes ‘Colín V-33’ and ‘Fundación II’, on the other hand, had deeper roots and could explore the deeper soil layers.

The use of rhizotrons allowed the study of root systems in a controlled environment, showing that it is a useful tool for such studies, that it is possible to visualize and quantify root growth adequately and it can provide the possible use of a specific rootstock for certain types of cultivation, such as container cultivation or specific soil conditions. However, such a possibility needs to be verified under the relevant conditions as well as our results, especially the genotypes studied as grafted plants and their interactions.

Author Contributions: Conceptualization, N.E.G.-F. and A.F.B.-P.; methodology, A.F.B.-P., E.C.-R. and M.T.B.C.y.L.; software, A.F.B.-P.; validation, A.F.B.-P., M.T.B.C.y.L. and P.S.G.; formal analysis, N.E.G.-F. and A.F.B.-P.; writing—original draft preparation, N.E.G.-F. and A.F.B.-P.; writing—review and editing, N.E.G.-F., A.F.B.-P., E.C.-R., M.T.B.C.y.L. and P.S.G.; funding acquisition, A.F.B.-P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Acknowledgments: N.E.G.-F. would like to thank the scholarship given by CONAHCyT. The authors thank the Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S.C. for supplying some of the plant material used in the study and the Coordinación General de Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Darrouy Palacios, N.; Castro Valdebenito, M.; Cautín Morales, R.; Kort Silva, L.; Bozzolo Artaza, R. Efecto de la posición de la yema y de la poda en plantas de aguacate destinadas a la clonación. *Rev. Fitotec. Mex.* **2010**, *33*, 249–256. [\[CrossRef\]](#)
2. González-Calderón, V.M.; Barrientos-Priego, A.F.; Núñez-Colín, C.A.; Ramírez-Ramírez, S.P.; Arpaia, M.L. Anatomía de la lámina de hoja en ocho cultivares de aguacate. *Rev. Mexicana Cienc. Agríc.* **2011**, *2*, 733–744. [\[CrossRef\]](#)
3. Meza-Castillo, E.; Barrientos-Priego, A.F.; Rodríguez-Pérez, J.E.; Reyes-Alemán, J.C.; Borys, M.W.; Espíndola-Barquera, M.C. Caracterización morfológica e histológica de ápices de raíz de portainjertos de aguacate y su resistencia a factores adversos en el suelo. *Bioagro* **2018**, *30*, 107–116.

4. Ibarra-López, A.; Ojeda-Zacarías, M.D.; García-Zambrano, E.; Gutiérrez-Diez, A. Inducción *in vitro* de brotes de dos cultivares de aguacate raza Mexicana *Persea americana* var. *drymifolia* Schlttdl. & Cham. *Rev. Mexicana Cienc. Agríc.* **2016**, *7*, 337–347.
5. Freire Alberti, M.; Amaral Brogio, B.D.; Rodrigues da Silva, S.; Cantuarias-Avilés, T.; Fassio, C. Avances en la propagación de aguacate. *Rev. Bras. Frutic.* **2018**, *40*, e-782.
6. Fassio, C.; Cautin, R.; Pérez-Donoso, A.; Bonomelli, C.; Castro, M. Propagation techniques and grafting modify the morphological traits of roots and biomass allocation in avocado trees. *Horttechnology* **2016**, *26*, 63–69. [[CrossRef](#)]
7. Lesmes-Vesga, R.A.; Chaparro, J.X.; Sarkhosh, A.; Ritenour, M.A.; Cano, L.M.; Rossi, L. Effect of propagation systems and indole-3-butyric acid potassium salt (K-IBA) concentrations on the propagation of peach rootstocks by stem cuttings. *Plants* **2021**, *10*, 1151. [[CrossRef](#)]
8. Salazar-García, S.; Medina-Torres, R.; Ibarra-Estrada, M.E.; González-Valdivia, J. Influencia de portainjertos clonales sobre la concentración foliar de nutrimentos en aguacate ‘Hass’ cultivado sin riego. *Rev. Chapingo Ser. Hort.* **2016**, *22*, 161–175.
9. Brokaw, W.H. Avocado clonal propagation. *Proc. Int. Plant Prop. Soc.* **1987**, *37*, 97–103.
10. Barrientos-Priego, A.F.; Muñoz-Pérez, R.; Reyes-Alemán, J.C.; Borys, M.W.; Martínez-Damián, M.T. Taxonomía, cultivares y portainjertos. In *El Aguacate y su Manejo Integrado*, 2nd ed.; Téliz, D., Mora, A.C., Eds.; Mundi Prensa: Distrito Federal, México, 2007; pp. 31–62.
11. Silber, A.; Israeli, Y.; Levi, M.; Keinan, A.; Shapira, O.; Chudi, G.; Golan, A.; Noy, M.; Levkovitch, I.; Assouline, S. Response of ‘Hass’ avocado trees to irrigation management and root constraint. *Agric. Water Manag.* **2012**, *104*, 95–103. [[CrossRef](#)]
12. Beyer, C.P.; Cuneo, I.F.; Alvaro, J.E.; Pedreschi, R. Evaluation of aerial and root plant growth behavior, water and nutrient use efficiency and carbohydrate dynamics for Hass avocado grown in a soilless and protected growing system. *Sci. Hortic.* **2021**, *277*, 109830. [[CrossRef](#)]
13. Foster, T.M.; Celton, J.M.; Chagné, D.; Tustin, D.S.; Gardiner, S.E. Two quantitative trait loci, Dw1 and Dw2, are primarily responsible for rootstock-induced dwarfing in apple. *Hortic. Res.* **2015**, *2*, 15001. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Fassio, C.; Cautin, R.; Perez-Donoso, A.G.; Castro, M. Comparative branching order and root anatomy of clonal and seed grown avocado trees (*Persea americana* Mill.). *Int. J. Agric. Nat. Resour.* **2020**, *41*, 134–144. [[CrossRef](#)]
15. Alzugaray, P.; Haase, D.; Rose, R. Efecto del volumen radicular y la tasa de fertilización sobre el comportamiento en terreno de plantas de pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco producidas con el método 1+1. *Bosques* **2004**, *25*, 17–33. [[CrossRef](#)]
16. Castro, M.; Fassio, C.; Darrouy, N. Portainjertos de aguacate en Chile. *Hortic. Intern.* **2008**, *62*, 42–46.
17. Cabeza, R.A.; Claassen, N. Sistemas radicales de cultivos: Extensión, distribución y crecimiento. *Agro Sur* **2017**, *45*, 31–45. [[CrossRef](#)]
18. Holzgreve, H.; Eick, M.; Stöhr, C. Protease activity in the rhizosphere of tomato plants is independent from nitrogen status. In *Root Biology-Growth, Physiology, and Functions*; Ohya, T., Ed.; IntechOpen: London, UK, 2019; pp. 3–16.
19. Lesmes-Vesga, R.A.; Cano, L.M.; Ritenour, M.A.; Sarkhosh, A.; Chaparro, J.X.; Rossi, L. Rhizoboxes as rapid tools for the study of root systems of *Prunus* seedlings. *Plants* **2022**, *11*, 2081. [[CrossRef](#)]
20. Frolich, E.; Platt, R. Use of the etiolation technique in rooting avocado cuttings. *Calif. Avocado Soc. Yearb.* **1972**, *55*, 97–109.
21. Bràmoff, M.D.; Magalhães, P.J.; Ram, S.J. Image processing with ImageJ. *Biophotonics Intern.* **2004**, *11*, 36–42.
22. Seethepalli, A.; Dhakal, K.; Griffiths, M.; Guo, H.; Freschet, G.T.; York, L.M. RhizoVision Explorer: Open-source software for root image analysis and measurement standardization. *AoB Plants* **2021**, *13*, plab056. [[CrossRef](#)]
23. SAS. *SAS® Studio 3.8: Administrator’s Guide*; SAS Institute Inc.: Cary, NC, USA, 2023; 58p.
24. López-Santiago, J.; Nieto-Ángel, R.; Barrientos-Priego, A.F.; Rodríguez-Pérez, E.; Colinas-León, M.T.; Borys, M.W.; González-Andrés, F. Selección de variables morfológicas para la caracterización del tejocote (*Crataegus* spp.). *Rev. Chapingo Ser. Hort.* **2008**, *14*, 97–111.
25. Núñez-Colín, C.A.; Escobedo-López, D. Uso correcto del análisis clúster en la caracterización de germoplasma vegetal. *Agron. Mesoam.* **2011**, *22*, 415–427. [[CrossRef](#)]
26. Hammer, Ø.; Harper, D.A. Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.* **2001**, *4*, 4.
27. Lesmes-Vesga, R.A.; Cano, L.M.; Ritenour, M.A.; Sarkhosh, A.; Chaparro, J.X.; Rossi, L. Variation in the root system architecture of peach × (peach × almond) backcrosses. *Plants* **2023**, *12*, 1874. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Cichi, M.; Gheorghiu, N. Aspects regarding variety/rootstock relationship in some species of fruit species. *Ann. Univ. Craiova-Agric. Montanol. Cadastre Ser.* **2022**, *52*, 73–78. [[CrossRef](#)]
29. Carr, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of avocado (*Persea americana* Mill.): A review. *Exp. Agric.* **2013**, *49*, 256–278. [[CrossRef](#)]
30. Lynch, J.P. Harnessing root architecture to address global challenges. *Plant J.* **2021**, *109*, 415–431. [[CrossRef](#)]
31. Atkinson, D.; Wilson, S.A. The root-soil interface and its significance for fruit tree roots of different ages. In *The Soil–Root Interface*; Harley, J.L., Russell, R.S., Eds.; Academic Press: London, UK, 1979; pp. 259–271.

32. Meneses, T.N.; Coelho Filho, M.A.; Santos Filho, H.P.; Santos, L.L.D.A.; Gesteira, A.D.S.; Soares Filho, W.D.S. Rootstocks and planting types on root architecture and vegetative vigor of 'Pera' sweet orange trees. *Rev. Bras. Engn. Agríc. Ambient.* **2020**, *24*, 685–693. [\[CrossRef\]](#)
33. He, W.; Luo, C.; Wang, Y.; Wen, X.; Wang, Y.; Li, T.; Chen, G.; Zhao, K.; Li, X.; Fan, C. Response strategies of root system architecture to soil environment: A case study of single-species *Cupressus funebris* plantations. *Front. Plant Sci.* **2022**, *13*, 822223. [\[CrossRef\]](#)
34. Yang, C.; Fredua-Agyeman, R.; Hwang, S.F.; Gorim, L.Y.; Strelkov, S.E. Genome-wide association studies of root system architecture traits in a broad collection of *Brassica* genotypes. *Front. Plant Sci.* **2024**, *15*, 1389082. [\[CrossRef\]](#)
35. Petersson, S.V.; Johansson, A.I.; Kowalczyk, M.; Makoveychuk, A.; Wang, J.Y.; Moritz, T.; Grebe, M.; Benfey, P.N.; Sandberg, G.; Ljung, K. An auxin gradient and maximum in the *Arabidopsis* root apex shown by high-resolution cell-specific analysis of IAA distribution and synthesis. *Plant Cell* **2009**, *21*, 1659–1668. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Barker, R.; Fernandez Garcia, M.N.; Powers, S.J.; Vaughan, S.; Bennett, M.J.; Phillips, A.L.; Thomas, S.G.; Hedden, P. Mapping sites of gibberellin biosynthesis in the *Arabidopsis* root tip. *New Phytol.* **2021**, *229*, 1521–1534. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Pokhrel, S.; Meyering, B.; Bowman, K.D.; Albrecht, U. Horticultural attributes and root architectures of field-grown 'Valencia' trees grafted on different rootstocks propagated by seed, cuttings, and tissue culture. *HortScience* **2021**, *56*, 163–172. [\[CrossRef\]](#)
38. Blois, L.; de Miguel, M.; Bert, P.F.; Ollat, N.; Rubio, B.; Voss-Fels, K.P.; Schmid, J.; Marguerit, E. Dissecting the genetic architecture of root related traits in a grafted wild *Vitis berlandieri* population for grapevine rootstock breeding. *Theor. Appl. Genet.* **2023**, *136*, 223. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
39. Serrano, A.; Wunsch, A.; Sabety, J.; van Zoeren, J.; Basedow, M.; Miranda Sazo, M.; Fuchs, M.; Khan, A. The comparative root system architecture of declining and non-declining trees in two apple orchards in New York. *Plants* **2023**, *12*, 2644. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
40. Yan, W.; Frégeau-Reid, J. Breeding line selection based on multiple traits. *Crop Sci.* **2008**, *48*, 417–423. [\[CrossRef\]](#)
41. Dutta, C.; Sarma, R.N. Role of root traits and root phenotyping in drought tolerance. *Int. J. Environ. Clim.* **2022**, *12*, 2300–2309. [\[CrossRef\]](#)
42. Katuuramu, D.N.; Wechter, W.P.; Washington, M.L.; Horry, M.; Cutulle, M.A.; Jarret, R.L.; Levi, A. Phenotypic diversity for root traits and identification of superior germplasm for root breeding in watermelon. *HortScience* **2020**, *55*, 1272–1279. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

CAPÍTULO 4. INFLUENCIA DEL INJERTO SOBRE EL SISTEMA RADICAL DEL PORTAINJERTO DE AGUACATE⁴

Nancy Elena Gonzalez-Florez¹, Alejandro Facundo Barrientos-Priego^{1*},
Prometeo Sánchez García², Eduardo Campos-Rojas¹, María Teresa Beryl
Colinas y Leon¹

¹Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 carretera, México-Texcoco, Texcoco 56230, MX, México.

²Especialidad de Edafología, Colegio de posgraduados, Km. 36.5 Carretera, México-Texcoco, Texcoco 56264, MX, México.

*Autor para Correspondencia: abarrientosp@chapingo.mx

RESUMEN

La influencia del portainjerto sobre el injerto ha sido ampliamente estudiada; sin embargo, el efecto recíproco en particular, la relación del injerto sobre el sistema radical del portainjerto ha recibido poca atención. El propósito de este estudio fue identificar el posible efecto de cultivares enanos y un genotipo vigoroso utilizados como injertos sobre el crecimiento y desarrollo del sistema radical de un portainjerto de la raza antillana de semilla. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones. Las plantas se establecieron en rizotrones y evaluadas, durante un período de seis meses. Se analizaron 35 variables relacionadas con el crecimiento radical mediante un programa especializado en análisis en raíces. Los análisis estadísticos incluyeron análisis de varianza, depuración de variables y análisis multivariado. Los resultados mostraron que las combinaciones 'Encinos'/Antillano y 'San Martín'/Antillano presentaron diferencias estadísticas significativas en la mayoría de las variables, donde destacó 'San Martín'/Antillano con un menor desarrollo del sistema radical. El uso de rizotrones permitió visualizar de manera clara que el crecimiento radical fue determinado por el cultivar injertado, los genotipos que inducen un menor desarrollo de raíces podrían considerarse como interinjertos potenciales para sistemas de producción en contenedores, aunque esto último se debe comprobar.

Palabras claves: *Persea americana* Mill., rizotrón, interacción injerto/portainjerto, crecimiento radical.

⁴ Sometido a: Sin someter
Estatus: No enviado

4.1. Introducción

La injertación es una práctica ampliamente utilizada en la horticultura moderna, para mejorar características agronómicas, en frutales como el aguacate. La importancia de esta técnica radica en la interacción entre el injerto, que corresponde a la parte aérea, y el portainjerto, que constituye el sistema radical de soporte (Shu et al., 2017). La integración de ambas partes durante la injertación origina una interfaz biológica que desencadena una compleja red de interacciones fisiológicas, bioquímicas y moleculares (Habibi et al., 2022).

Estas interacciones son bidireccionales y se sostienen a través del sistema vascular, donde el xilema y el floema actúan como canales de comunicación activa. Estudios recientes han demostrado que, además del transporte de agua, minerales y compuestos orgánicos, el flujo vascular permite el movimiento de moléculas reguladoras como proteínas, ARN mensajeros y pequeñas moléculas señalizadoras que modulan el crecimiento, desarrollo y respuestas adaptativas de la planta (Zhou et al., 2022). Esta conexión fisiológica sugiere que no solo el portainjerto puede influir en el comportamiento del injerto, sino que también el injerto puede modificar rasgos importantes del portainjerto, que incluye el desarrollo y la arquitectura del sistema radical.

Tradicionalmente, la mayoría de los estudios se han centrado en evaluar el efecto del portainjerto sobre características del injerto, como el vigor, la precocidad de floración, la producción, la calidad del fruto y la resistencia a factores adversos (Kolekar, 2024). Se ha documentado que el portainjerto desempeña un papel crucial en la arquitectura del sistema radical, la absorción de agua y nutrientes, y la interacción con microorganismos del suelo, factores que inciden directamente en el crecimiento y productividad de la planta (Montesinos et al., 2022). Además, el portainjerto puede conferir tolerancia a estreses abióticos como la salinidad, la sequía y las bajas temperaturas, así como resistencia a enfermedades del suelo. La compatibilidad entre el injerto y el portainjerto, mediada por la regeneración

del xilema y floema, también determina la eficiencia del ensamblaje fisiológico, y afecta la funcionalidad general de la planta (Aloni et al., 2010).

Sin embargo, estudios recientes han demostrado que el injerto también puede influir activamente en el desarrollo del sistema radical del portainjerto. Cichi y Gheorghiu (2022) señalaron que el crecimiento de las raíces no depende exclusivamente de la genética del portainjerto ni de las condiciones ambientales, sino también de su interacción con el injerto. En el caso del aguacate, Alberti et al. (2018) encontraron que ciertos cultivares injertados modifican el desarrollo de raíces principales y laterales, mejorando la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes, y acortando el tiempo necesario para la producción en vivero. Dado que el sistema radical es esencial para la captación de recursos y, por tanto, para la fisiología y productividad de la planta, se ha convertido en un objetivo estratégico para mejorar la tolerancia al estrés abiótico y optimizar el rendimiento (Meister et al., 2014; Maqbool et al., 2022; Blois et al., 2023). Así mismo, se ha observado que el injerto puede modificar la concentración de nutrientes en los tejidos foliares del portainjerto (Salazar-García et al., 2016), lo que evidencia una retroalimentación funcional entre ambas partes del árbol.

En los últimos años, se ha incrementado el interés en el uso de portainjertos enanizantes, especialmente en especies como el aguacate. Estos portainjertos tienen la capacidad de reducir el vigor vegetativo de la copa, redirigiendo parte de la energía metabólica hacia la producción de frutos, lo que puede traducirse en mejoras en la calidad y rendimiento del cultivo. No obstante, los mecanismos que regulan este efecto enanizante aún no se comprenden completamente y parecen involucrar una combinación de factores fisiológicos, genéticos y moleculares (Biasuz & Kalcsits, 2023). Esta complejidad resalta la necesidad de explorar en mayor profundidad cómo el injerto puede influir sobre las raíces del portainjerto, especialmente cuando se utilizan cultivares enanos.

Dado que el sistema radical es fundamental para la absorción de agua y nutrientes, y por ende para la fisiología general de la planta, entender cómo se ve afectado por la parte aérea injertada es clave para mejorar la eficiencia

de los sistemas productivos, en especial en condiciones controladas como en la posibilidad de cultivo en contenedores. Sin embargo, la influencia del injerto sobre el desarrollo del sistema radical ha sido escasamente documentada. En este sentido, herramientas como los rizotrones ofrecen una ventaja significativa al permitir la observación directa y no destructiva del crecimiento radical a lo largo del tiempo, lo que facilita el estudio de las interacciones de desarrollo entre injerto y portainjerto. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue describir el comportamiento de crecimiento de las raíces en portainjertos de aguacate de raza antillana, propagados sexualmente e injertados con cinco cultivares enanos, con el uso de un sistema de rizotrones con la finalidad de identificar cultivares con potencial efecto modulador del desarrollo radical, los cuales podrían ser prospectos como interinjertos promisorios para la producción en sistemas intensivos o en contenedores

4.2. Materiales y métodos

Esta investigación se realizó en un invernadero del Departamento de Fitotecnia en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado en Chapingo, Estado de México.

4.2.1. Material vegetal

Se seleccionaron cuatro cultivares enanos y uno de crecimiento vigoroso de aguacate del banco de germoplasma de la Universidad Autónoma Chapingo para ser injertados en plántulas derivadas de semilla de aguacate antillano. Se obtuvieron semillas de aguacate antillano provenientes de la región de Veracruz, las cuales se establecieron en una cama de germinación con perlita como sustrato, una vez que emergieron se trasplantaron a bolsas de polietileno negro de un litro de capacidad empleando una mezcla de suelo y perlita 1:1, cuando las plantas alcanzaron el diámetro adecuado se realizó un injerto por hendidura simple de los cultivares (Cuadro 1).

4.2.2. Establecimiento de experimento

Basados en estudios previos realizados por Lesmes-Vesga et al. (2022) se decidió utilizar este método para evaluar al injerto sobre el crecimiento radical del portainjerto. Después de la unión completa del injerto, se realizó una poda

de raíces y se trasplantaron a raíz desnuda a rizotrones de 40 cm x 40 cm x 2.5 cm. Los rizotrones consistieron en dos placas de vidrio transparente de 40 cm x 40 cm de longitud unidas a ambas caras con un marco de madera de tres lados con un fondo perforado para permitir la filtración del agua y se usó como sustrato arena de río (4 L). Ambas caras del rizotrón se cubrieron con polietileno bicolor blanco y negro (Agripolyane - Tecnologías Agrícola del centro S.A de C.V., Tulancingo de Bravo, México) con el lado blanco hacia afuera para evitar la luz y mantener las raíces en condiciones de oscuridad, el experimento se mantuvo en condiciones de invernadero con temperaturas promedio de 17 °C y humedad relativa de 71.9 %. Se utilizó un sistema de fertirriego por goteo con dos emisores calibrados para suministrar 4 L por hora cada uno, con una frecuencia de riego de dos minutos cada 24 h y, en invierno un minuto cada 24 h durante todo el experimento, ya que las necesidades hídricas eran menores en este último periodo debido a las temperaturas más bajas, la fórmula de nutrientes suministrada en mg L⁻¹ fue la siguiente: 59 (N), 11 (P), 96 (K), 63 (Ca), 17 (Mg), 3 (Fe), 0.025 (Cu), 0.5 (Mn), 0.05 (Zn) y 0.5 (B).

Cuadro 5. Genotipos de aguacate estudiados y sus características.

Tratamiento	Genotipo	Origen y Raza	Característica
'Encinos'/Antillano	'Encinos'	Coatepec Harinas, Estado de México, México.	Crecimiento muy vigoroso y erguido
'Colin 33'/Antillano	V- 'Colin V-33'	Ixtapan de la Sal, Estado de México, México.	Crecimiento enano, entrenudos de longitud media, crecimiento lateral extenso de las ramas, pérdida de dominancia apical, árbol pequeño.
'Don Enano'/Antillano	Cris 'Don Enano' Cris	Tequexquinahuac, Estado de México, México.	Crecimiento enano de entrenudos cortos. Hojas muy rugosas y gruesas, brotes gruesos.
'Fundación II'/Antillano	'Fundación II'	Coatepec Harinas, Estado de México, México.	Crecimiento enano, entrenudos de longitud media, crecimiento lateral, pérdida de dominancia apical.
'San Martín'/Antillano	'San Martín'	Tezuitlán, Puebla, México.	Crecimiento enano de entrenudos cortos. Hojas pequeñas y de crecimiento muy compacto. Con brotes delgados.

4.2.3. Seguimiento de sistema de raíces

Los sistemas radicales de las plantas de aguacate se fotografiaron desde cada lado del rizotrón, una vez cada dos semanas durante seis meses para asegurar un buen desarrollo de las mismas, y se realizaron gráficos para visualizar el comportamiento de las raíces. Después de ese periodo se extrajeron para su medición retirando uno de los cristales del rizotrón, y se utilizó un tablero de clavos para extraer cada plántula, para mantener la distribución espacial de las raíces, el tablero de clavos consistió en un panel de acrílico con clavos de 2.5 cm de longitud separados por 2.5 cm x 2.5 cm de longitud, el sustrato se separó de las raíces insertadas en el tablero de clavos rociando suavemente agua, una vez extraídos los sistemas radicales de los rizotrones se tomaron fotografías.

4.2.4. Programa de análisis de imágenes y mediciones

A partir de las fotografías digitales tomadas cada dos semanas, se midió profundidad y anchura alcanzadas por el sistema radical completo, y se estimó la relación profundidad:anchura con las imágenes que fueron procesadas con el Software ImageJ versión 1.48v (Abràmoff et al., 2004). Estas dos variables también se cuantificaron para raíz desnuda con el fin de disponer de datos en tal condición.

Se utilizó el programa especializado RhizoVision Explorer versión 2.0.3 (Seethepalli et al., 2021), para procesar las fotografías digitales obtenidas. El programa por rutina proporciona datos para 35 variables (Cuadro 2) que se utilizaron para el análisis estadístico.

4.2.5. Repeticiones, diseño experimental y análisis estadístico

En el experimento se empleó un diseño de bloques completos al azar conforme, al sistema de riego presurizado, con cinco tratamientos y tres repeticiones (plantas). Los datos resultantes de las variables se compararon entre tratamientos con análisis de varianza, error estándar, comparaciones de media de Tukey ($P \leq 0.5$) con el programa estadístico SAS versión 9.4 (SAS, 2023). Las variables del Cuadro 2 fueron depuradas conforme a (López-Santiago et al., 2008). Ya que se realizaron procedimientos para eliminar

variables altamente asociadas y sin diferencias, y asegurar un adecuado análisis de componentes principales, además de un análisis de agrupamiento Neighbor joining y la distancia Manhattan (Núñez-Colín & Escobedo-López, 2011) con 10000 remuestreos mediante el programa PAST 3.26 (Hammer et al., 2001). Este remuestreo (bootstrap) nos permitió tener una mejor idea de los conglomerados formados y nos proporcionó un dendrograma con una alta probabilidad de ocurrencia.

Cuadro 6. Variables radicales evaluadas en portainjerto antillano injertados con cinco cultivares de aguacate según el programa RhizoVision Explorer. Se puede encontrar más detalle de cada variable en el manual (<https://www.rhizovision.com/manual>; consultado el 7 de abril de 2025) o en el documento de Seethepalli et al. (2021).

	Abreviación	Variable
1	MinNR	Media del número de raíces
2	MaxNR	Número máximo de raíces
3	NRT	Número de ápices radicales
4	TRL	Longitud total de raíces (mm)
5	Depth	Profundidad (mm)
6	MW	Anchura máxima (mm)
7	WDR	Relación anchura profundidad
8	NA	Área de red (mm ²)
9	CA	Área convexa (mm ²)
10	S	Solidez
11	LRA	Área baja de las raíces (mm ²)
12	AD	Diámetro promedio (mm)
13	MedD	Diámetro medio (mm)
14	MaxD	Diámetro máximo (mm)
15	P	Perímetro (mm)
16	Vol	Volumen (mm ³)
17	SA	Área superficial (mm ²)
18	H	Huecos
19	AH	Tamaño promedio de huecos (mm ²)
20	ARO	Orientación promedio de raíces
21	SAF	Frecuencia de ángulos superficiales
22	MAF	Frecuencia media de ángulos
23	SteepAF	Frecuencia de ángulos inclinados
24-26	RLDR 1-3 layer	Longitud del diámetro de raíces (mm)
27-29	PADR 1-3 layer	Área de diámetro proyecta (mm ²)
30-32	SADR 1-3 layer	Superficie de diámetro proyecta (mm ²)
33-35	VDR 1-3 layer	Diámetro volumen (mm ³)

4.3. Resultados

4.3.1. Seguimiento de sistema de raíz completo en rizotrón

El sistema radical del portainjerto mostró diferencia al final de su seguimiento en los rizotrones para profundidad (Figura 1), no mostró diferencias en cuatro de los genotipos injertados y se presentó diferencia del injerto de 'Encinos'/Antillano con el injerto de 'San Martín'/Antillano, donde este último portainjerto mostró menor profundidad de raíces.

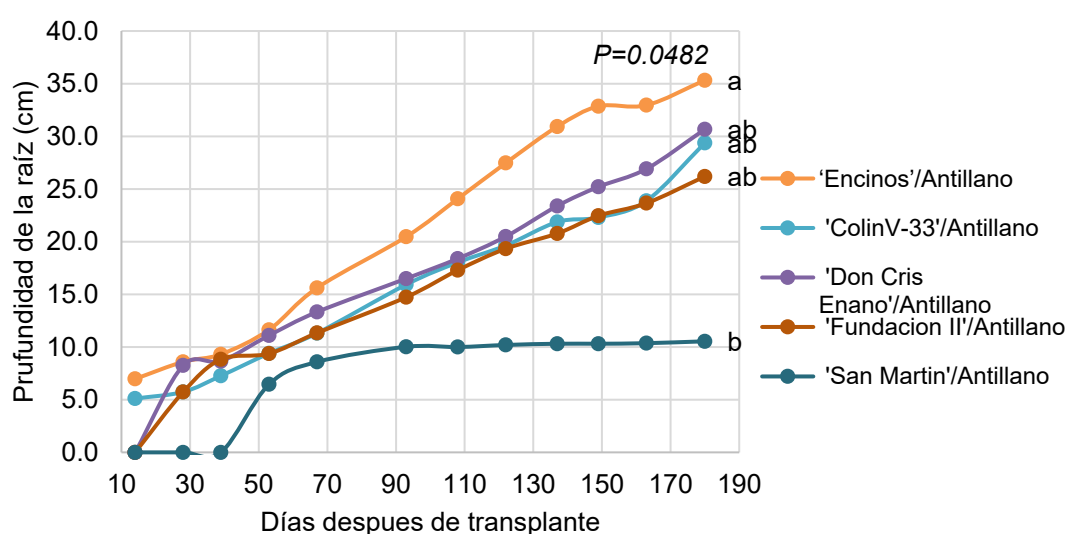


Figura 1. Profundidad del sistema radical de aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido del seguimiento de rizotrones mediante fotografías digitales. Las letras del último día indican valores diferentes según la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

En la anchura final (Figura 2) el portainjerto injertado con 'San Martín'/Antillano presento la menor anchura, siendo estadísticamente igual a 'Fundación II'/Antillano y 'Colin V-33'/Antillano, pero diferente a los dos tratamientos restantes. No se presentó diferencias en la última medición de la relación profundidad/anchura de los portainjertos injertados con los cinco cultivares (Figura 3). Cabe indicar que el seguimiento en rizotrones son estimaciones del crecimiento del sistema radical y puede diferir del sistema de raíces total, ya que no se puede observar todo.

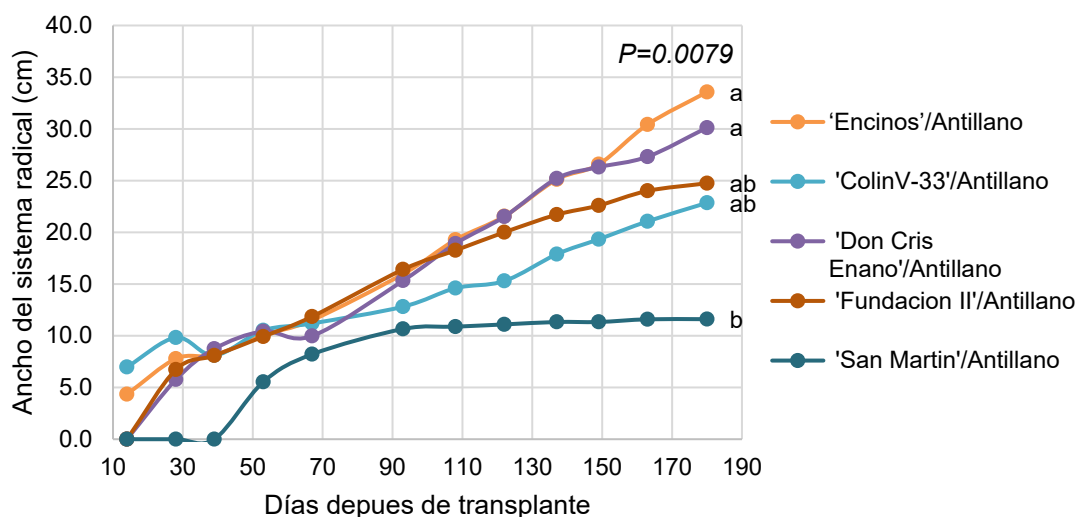


Figura 2. Ancho del sistema radical aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido del seguimiento de rizotrones mediante fotografías digitales. Las letras del último día indican valores diferentes según la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

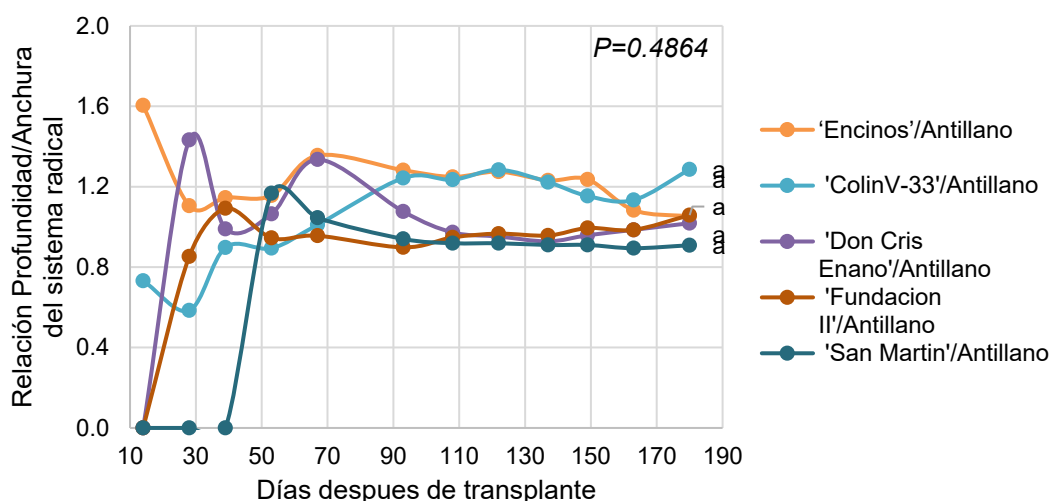


Figura 3. Relación profundidad/anchura del sistema radical aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido del seguimiento de rizotrones mediante fotografías digitales. Las letras del último día no indican valores diferentes según la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

4.3.2. Sistema de raíz completo fuera del rizotrópico

El sistema radical fue más profundo para injertos de 'Colín V-33'/Antillano sin diferencias con 'Encinos'/Antillano, 'Don Cris Enano'/Antillano y 'Fundación II'/Antillano (Figura 4A), a su vez 'Fundación II'/Antillano es igual a 'San Martín'/Antillano, en cuanto a anchura 'San Martín'/Antillano fue diferente a los demás y presentó la menor anchura (Figura 4B).

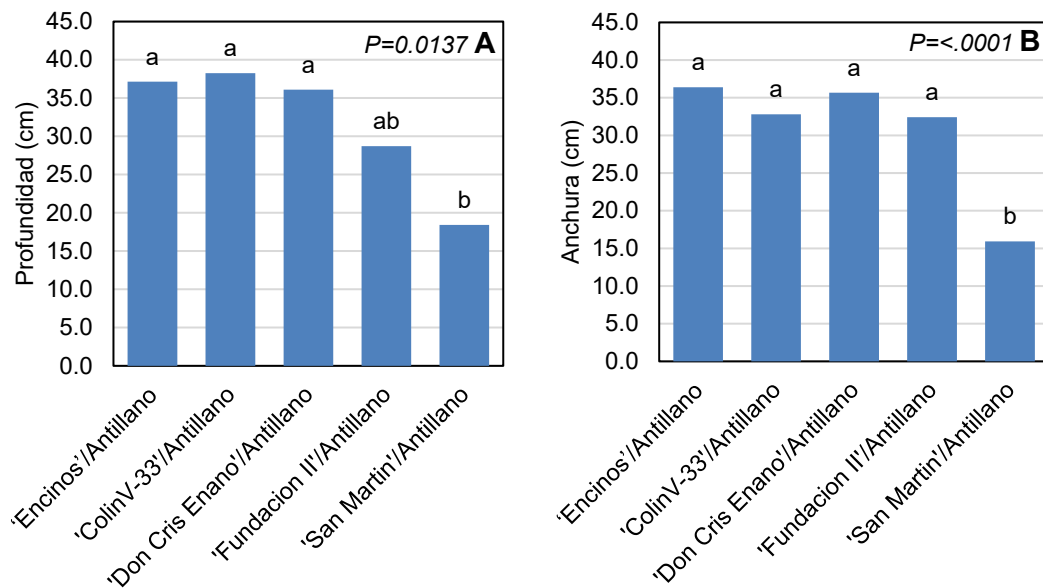


Figura 4. A) profundidad y B) ancho del del sistema radical aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido después de su extracción de rizotrones. Las letras indican valores diferentes según la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

El volumen del sistema radical fue mayor en 'Encinos'/Antillano sin diferencias con 'Colín V-33'/Antillano, 'Don Cris Enano'/Antillano y 'Fundación II'/Antillano, mientras que 'San Martín'/Antillano presentó el menor valor sin diferencias con 'Colín V-33'/Antillano, 'Don Cris Enano'/Antillano y 'Fundación II'/Antillano (Figura 5).

4.3.3. Variables principales de crecimiento de las raíces mediante análisis de imágenes

'Encinos'/Antillano fue diferente a 'San Martín'/Antillano en número máximo de raíces (Figura 6A), y longitud total de la raíz (Figura 6C), a su vez 'Encinos'/Antillano fue igual a 'Colín V-33'/Antillano, 'Don Cris Enano'/Antillano y 'Fundación II'/Antillano. No se presentaron diferencias significativas en número de ápices de raíz (Figura 6B) y diámetro promedio de raíces (Figura 6D). 'San Martín'/Antillano presentó el valor más bajo para todas las variables. Tales diferencias pueden apreciarse visualmente en las fotografías correspondientes (Figura 7).

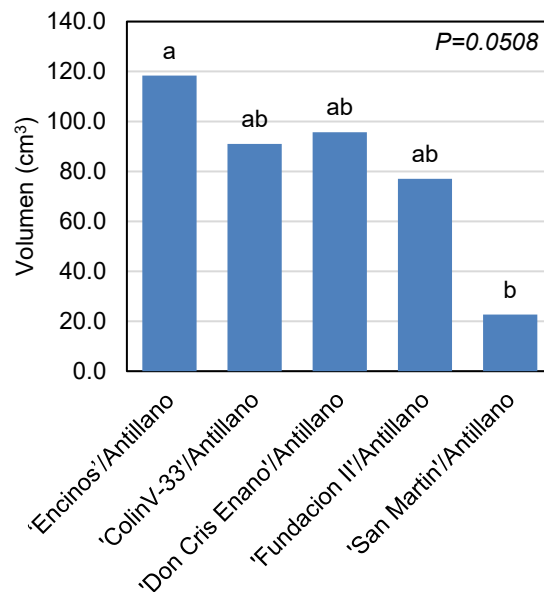


Figura 5. Volumen sistema radical aguacate antillano injertados con cinco cultivares, obtenido después de su extracción de rizotrones. Las letras indican valores diferentes según la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

4.3.4. Depuración y análisis de componentes principales (ACP) de variables de crecimiento de las raíces

Después de la depuración de variables resultaron las siguientes: número máximo de raíces, ancho máximo de sistema radical (mm), relación profundidad/anchura del sistema radical, solidez del sistema radical, diámetro máximo de raíces (mm), frecuencia del ángulo superficial, frecuencia de ángulo inclinado y área de superficie del diámetro de raíces en el estrato 3 (mm). Estos se analizaron en el ACP, así como en el análisis de conglomerados.

El primer componente principal explico el 99.9 % de la varianza total (Cuadro 3), y los valores de las principales que integraron estos componentes fueron el área de superficie del diámetro de raíces en el estrato 3 y ancho máximo de sistema radical (mm) para el CP 2 (Cuadro 4).

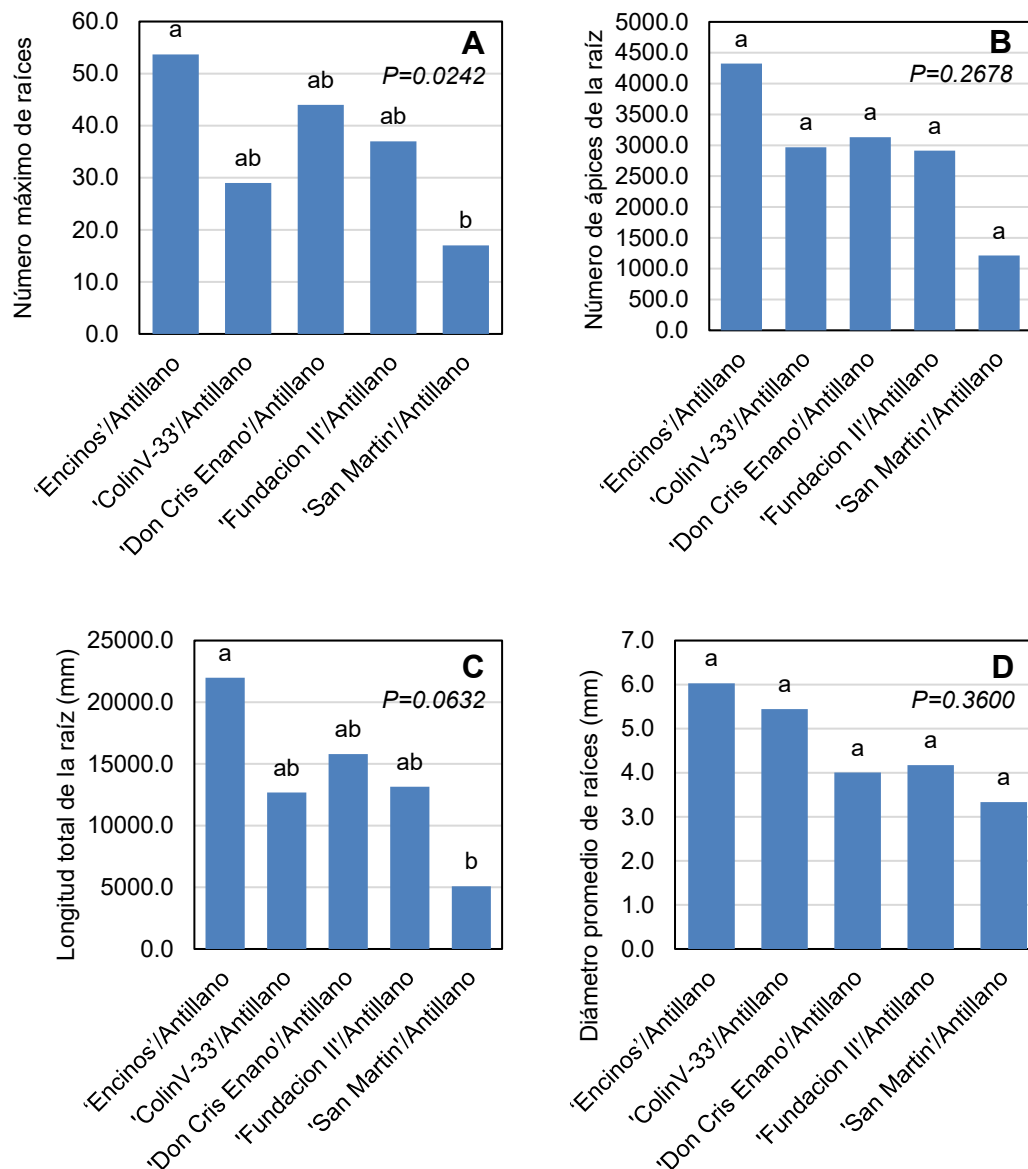


Figura 6. Variables morfológicas del sistema de radical de genotipos de aguacate después de ser retirados del rizotrón. A) número máximo de raíces, B) número de puntas de raíz, C) longitud total de la raíz, D) diámetro promedio de raíces. Las letras indican valores diferentes según la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

En la proyección bidimensional de aguacate antillano injertado con cinco cultivares para los cuatro componentes principales (Figura 8) se definieron tres grupos, el primero estaba formado por 'Colín V-33'/Antillano en el plano positivo, 'San Martin'/Antillano en el negativo, 'Encinos'/Antillano, 'Don Cris Enano'/Antillano y 'Fundación II'/Antillano en el positivo-negativo.



Figura 7. Sistema radical de aguacate Antillano injertado con cuatro genotipos enanos y uno vigoroso ('Encinos'), después de ser retirados de rizotrones. Escala de 30 cm.

Cuadro 7. Valores propios y varianza del análisis de componentes principales de las variables del sistema radical de aguacate antillano injertado con cinco genotipos, obtenido después de su extracción de rizotrones y el análisis de imágenes.

Componente principal	Eigenvalor	Varianza (%)
1	7.9815E+08	100
2	3937.45	0.00049332
3	18.3735	2.30E-06
4	2.74005	3.43E-07

Cuadro 4. Valores propios de las variables que forman los cuatro componentes principales (CP) del sistema radical de aguacate antillano injertado con cinco genotipos, obtenido después de su extracción de rizotrones y el análisis de imágenes.

Variable	CP 1	CP 2
Número máximo de raíces	0.00044096	-0.078949
Ancho máximo de sistema radical (mm)	0.0025958	0.99594
Relación profundidad/anchura	1.49E-06	-0.0021205
Solidez	-1.28E-06	-0.00034059
Diámetro máximo de raíces (mm),	-3.16E-05	0.043135
Frecuencia del ángulo superficial	3.09E-08	-1.08E-05
Frecuencia de ángulo inclinado	9.19E-07	-9.21E-05
Área de superficie del diámetro de raíces en el estrato 3 (mm)	1	-0.0025491

El análisis de agrupamiento mostró una notable similitud ente los tratamientos 'Don Cris Enano'/Antillano y 'Encinos'/Antillano que se agruparon más juntos y alejados del resto (Figura 9). Por el contrario 'San Martín'/Antillano se situó en una ramificación basal, indicando una mayor distancia respecto a los

demás, este resultado concuerda y refuerza los hallazgos en el análisis de componentes principales.

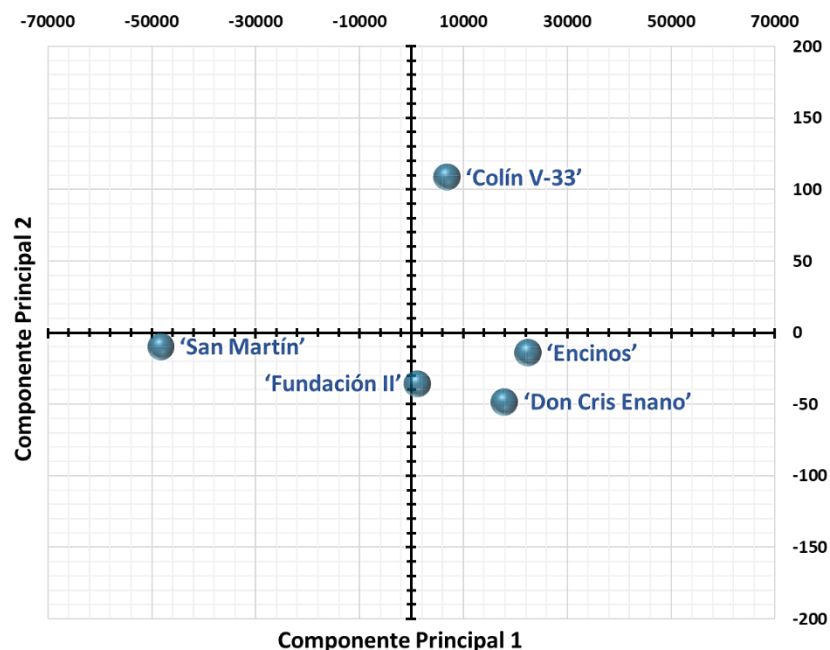


Figura 8. Dispersión del aguacate antillano injertados con cinco cultivares en el primer plano factorial de las dos primeras funciones del análisis de componentes principales.

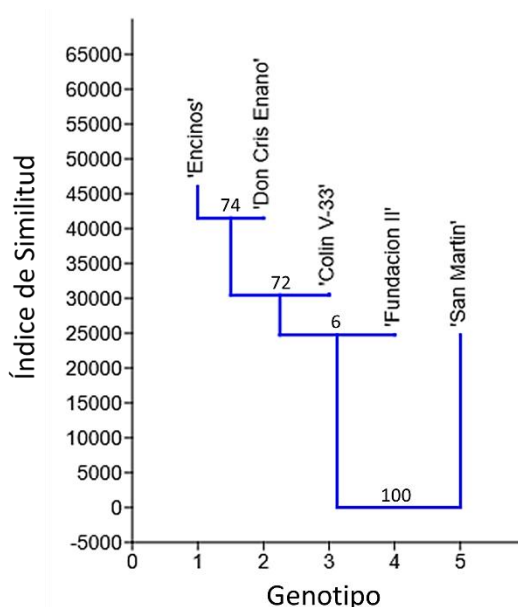


Figura 9. Agrupación del aguacate antillano injertados con cinco genotipos con el método de unión de vecinos y distancia Manhattan con 10000 remuestreos, derivados de las características del sistema radical. Los valores en las ramas son la probabilidad como porcentaje de ocurrencia.

4.4. Discusión

El sistema radical de 'San Martín'/Antillano fue notoriamente menor, lo que contrastó con lo indicado por Li et al. (2016), que en un estudio en manzanos injertados encontraron que las características de este afectan significativamente la tasa de crecimiento de las raíces del portainjerto, redujo la longitud y diámetro de raíces principales, esto se debe a cambios en la señalización hormonal (auxinas y citoquininas), metabolismo de azúcares y expresión génica, y alteró procesos como la división celular y el metabolismo energético. En vides, la arquitectura y biomasa del sistema radicular depende también de la combinación genotípica con el injerto (Larrey et al., 2025). En el caso de aguacate Gonzalez-Florez et al. (2025) encontraron que el sistema radical de portainjertos clonales presenta diferencias morfológicas y de desarrollo asociadas al genotipo.

Por otro lado, Alberti et al. (2018) encontraron que el injerto tiene efecto significativo sobre el desarrollo de las raíces principales y laterales del portainjerto de aguacate. De esa forma, el injerto puede mejorar la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes, y se reduce así el tiempo de producción de las plantas en vivero. Así mismo, Kohne (1992) demostró que diferentes portainjertos de aguacate pueden funcionar de manera considerablemente diferente con la misma variedad injertada. Esta interacción entre injerto y portainjerto juega un papel fundamental en el desarrollo del sistema radical, e influye tanto en la arquitectura como en la fisiología de las raíces.

Las características del injerto pueden influir significativamente y mejorar la tolerancia al estrés de los portainjertos mediante interacciones fisiológicas, hormonales y bioquímicas. En manzano, se ha demostrado que el perfil antioxidante y el estado nutricional de los injertos modulan la vitalidad del portainjerto, especialmente en condiciones de estrés, lo que afecta la actividad de las enzimas antioxidantes radicales, la asignación de nutrientes y la expresión de genes relacionados con el estrés en las raíces (Li et al., 2022). Esta atribución se extiende a los cambios en los niveles hormonales de las raíces y al manejo de especies reactivas de oxígeno, lo que subraya cómo las señales mediadas por el injerto que pueden reforzar la resiliencia del

portainjerto, tal como se ha encontrado en *Camellia oleifera*, donde diferentes cultivares injertados en el mismo portainjerto alteraron la morfología radicular, la eficiencia en el uso del fósforo y la tolerancia general al estrés por fósforo, lo que indicó una modulación de la dinámica de nutrientes impulsada por el injerto (Zeng et al., 2022).

Además, estudios de vid muestran que las combinaciones de injerto y portainjerto pueden presentar sinergias para mejorar la respuesta al estrés salino, donde incluso los portainjertos sensibles se desempeñan mejor al combinarse con ciertos injertos debido a una mejor integración fisiológica y posiblemente al vigor híbrido (Hanana et al., 2015). Si bien tradicionalmente se atribuye a los portainjertos la resistencia al estrés, estos hallazgos ilustran que los injertos pueden modular activamente la respuesta del portainjerto mediante señalización a larga distancia que puede involucrar hormonas, antioxidantes y posiblemente ARNm móviles. Esta comunicación bidireccional en sistemas injertados revela nuevas vías para mejorar el rendimiento de las plantas bajo estrés abiótico mediante la selección estratégica de injertos, y así mejorar la resiliencia general de la planta injertada.

El injerto influye significativamente en el desarrollo y la función del portainjerto a través de complejas vías de señalización bioquímica y genética. Estudios transcriptómicos en almendros han revelado que diferentes genotipos injertados modulan la expresión génica en el portainjerto, en particular los genes implicados en la señalización hormonal, la división celular y el crecimiento de raíces, lo que indica un intercambio bidireccional de señales de desarrollo entre los injertos (Montesinos et al., 2023). En la vid, se ha observado que las combinaciones injerto-portainjerto alteran la arquitectura y la densidad radicular en condiciones de estrés, como suelos arcillosos pesados, específicamente, los genotipos injertados afectaron la distribución en profundidad, la densidad y la proporción de raíces finas a gruesas, lo que demuestra una influencia directa en el comportamiento del sistema radicular (Ferlito et al., 2020).

Además, la composición del microbioma de la raíz y la rizosfera está determinada por los genotipos injertados y portainjertos, aunque estos últimos

tienen una mayor influencia en general; aun así, los injertos contribuyen a estructuras específicas de la comunidad microbiana que, a su vez, impactan la salud y la función radical (Lailheugue et al., 2024). Estas interacciones destacan la importancia de seleccionar el par injerto/portainjerto afín, no solo por sus características superficiales, sino también para optimizar el desarrollo del sistema de raíces, que influye en la absorción de recursos y la resiliencia frente a las tensiones ambientales. Si bien tradicionalmente se considera que el portainjerto es el principal impulsor del desarrollo radical, cada vez es más evidente que las características genéticas y fisiológicas del injerto pueden modular el rendimiento del portainjerto de forma dinámica y específica para cada contexto.

4.5. Conclusiones

‘Encinos’/Antillano fue diferente a ‘San Martín’/Antillano en profundidad, ancho del sistema y volumen de la raíz por lo que se puede concluir que el injerto sí tiene relación con el desarrollo y crecimiento de la raíz del portainjerto. Por sus características radicales, ‘Encinos’/Antillano, ‘Fundación II’/Antillano, ‘Don Cris Enano’/Antillano y ‘Colin V-33’/Antillano presentaron un patrón de crecimiento más profundo, lo que permite una mayor exploración del perfil del suelo, con variaciones específicas entre combinaciones.

4.6. Literatura Citada

- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics international*, 11(7), 36-42.
- Alberti, M. F., Amaral Brogio, B. d., Rodrigues da Silva, S., Cantuarias-Avilés, T., & Fassio, C. (2018). Avances en la propagación de aguacate. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 40(6), Article e-782. <https://doi.org/10.1590/0100-29452018782>
- Aloni, B., Cohen, R., Karni, L., Aktas, H. A., & Edelstein, M. (2010). Hormonal signaling in rootstock–scion interactions. *Scientia Horticulturae*, 127(2), 119-126.
- Biasuz, E. C., & Kalcsits, L. (2023). Rootstock effects on leaf function and isotope composition in apple occurred on both scion grafted and ungrafted rootstocks under hydroponic conditions. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1274195. doi:10.3389/fpls.2023.1274195
- Blois, L., de Miguel, M., Bert, P.F., Ollat, N., Rubio, B., Voss-Fels, K. P., Schmid, J., & Marguerit, E. (2023). Dissecting the genetic architecture

- of root-related traits in a grafted wild *Vitis berlandieri* population for grapevine rootstock breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 136(11), Article 223. <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04472-1>
- Cichi, M., & Gheorghiu, N. (2022). Aspects regarding variety/rootstock relationship in some species of fruit species. *Annals of the University of Craiova-Agriculture Montanology Cadastre Series*, 52(1), 73-78. <https://doi.org/10.52846/aamc.v52i1.1316>.
- Ferlito, F., Distefano, G., Gentile, A., Allegra, M., Lakso, A. N., & Nicolosi, E. (2020). Scion–rootstock interactions influence the growth and behaviour of the grapevine root system in a heavy clay soil. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 26(1), 68–78. <https://doi.org/10.1111/AJGW.12415>.
- Gonzalez-Florez, N. E., Barrientos-Priego, A. F., Campos-Rojas, E., Colinas y León, M. T., & Sánchez García, P. (2025). Root Systems of Five Clonal Avocado Genotypes. *Horticulturae*, 11, Article 232. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030232>.
- Habibi, F., Liu, T., Folta, K., & Sarkhosh, A. (2022). Physiological, biochemical, and molecular aspects of grafting in fruit trees. *Horticulture Research*, 9, Article uhac032. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac032>.
- Hammer, Ø., Harper, D., & Ryan, P.D. (2001). Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Palaeontologia electronica*, 4(1). Recuperado de http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.
- Hanana, M., Hamrouni, L., Hamed, K., & Abdelly, C. (2015). Influence of the rootstock/scion combination on the grapevines behavior under salt stress. *Plant Biochemistry & Physiology*, 3(3), Article 1000154. <https://doi.org/10.4172/2329-9029.1000154>.
- Kohne, J. S. (1992). Field Evaluation of 'Hass' Avocado Grown on Duke 7', G6 and G755C Rootstocks. *Proceedings of Second World Avocado Congress*, pp. 301-303.
- Kolekar, S. N. (2024). Rootstocks for tropical and sub- tropical fruit crops. *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences*, 3, 214-234. <https://www.doi.org/10.58532/V3BCAG16P6CH2>.
- Lailheugue, V., Darriaut, R., Tran, J., Morel, M., Marguerit, E., & Lauvergeat, V. (2024). Both the scion and rootstock of grafted grapevines influence the rhizosphere and root endophyte microbiomes, but rootstocks have a greater impact. *Environmental Microbiome*, 19(1), Article 24. <https://doi.org/10.1186/s40793-024-00566-5>.
- Larrey, M., Tandonnet, J.-P., Cast, C. S., Cookson, S. J., & Vivin, P. (2025). Exploring how graft length shapes root system architecture and morphology in grapevine rootstocks. *OENO One*, 59(1), Article 8226. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2025.59.1.8226>.
- Lesmes-Vesga, R., Cano, L., Ritenour, M., Sarkhosh, A., Chaparro, J., & Rossi, L. (2022). Rhizoboxes as Rapid Tools for the Study of Root

- Systems of Prunus Seedlings. *Plants*, 11, Article 2081. <https://doi.org/10.3390/plants11162081>.
- Li, G., Ma, J., Tan, M., Mao, J., An, N., Sha, G., Zhang, D., Zhao, C., & Han, M. (2016). Transcriptome analysis reveals the effects of sugar metabolism and auxin and cytokinin signaling pathways on root growth and development of grafted apple. *BMC Genomics*, 17, Article 150. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2484-x>.
- Li, G., Tan, M., Liu, X., Mao, J., Song, C., Li, K., Ma, J., Xing, L., Zhang, D., Shao, J., Ge, H., Sha, G., Han, M., & An, N. (2022). The nutrient, hormone, and antioxidant status of scion affects the rootstock activity in apple. *Scientia Horticulturae*, 302, Article 1111157. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.1111157>.
- López-Santiago, J., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A. F., Rodríguez-Pérez, E., Colinas-León, M. T., Borys, M. W., & González-Andrés, F. (2008). Selección de variables morfológicas para la caracterización del tejocote (*Crataegus* spp.). *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 14(2), 97-111.
- Maqbool, S., Hassan, MA, Xia, X., York, LM, Rasheed, A. & He, Z. (2022). Root system architecture in cereals: progress, challenges and perspective. *The Plant Journal*, 110(1), 23-42. <https://doi.org/10.1111/tpj.15669>
- Meister, R., Rajani, M.S., Ruzicka, D. & Schachtman, D.P. (2014) Challenges of modifying root traits in crops for agriculture. *Trends in Plant Science* 19(12), 779-788. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.08.005>
- Montesinos, Á., Grimplet, J., & Rubio-Cabetas, M. J. (2022). Proleptic and sylleptic shoot formation is affected by rootstock genotype in two-year-old branches of almond. *Agronomy*, 12(9), Article 2006. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092006>.
- Montesinos, Á., Rubio-Cabetas, M. J., & Grimplet, J. (2023). Characterization of almond scion/rootstock communication in cultivar and rootstock tissues through an RNA-Seq approach. *Plants*, 12(24), Article 4166. <https://doi.org/10.3390/plants12244166>.
- Núñez-Colín, C., & Escobedo-López, D. (2011). Uso correcto del análisis clúster en la caracterización de germoplasma vegetal. *Agronomía mesoamericana*, 22(2), 415-427.
- Salazar-García, S., Medina-Torres, R., Ibarra-Estrada, M. E., & González-Valdivia, J. (2016). Influence of clonal rootstocks on leaf nutrient concentrations in ‘Hass’ avocado grown without irrigation. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 22(3), 161-174. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.06.013>
- SAS. (2023). *SAS® Studio 3.8: Administrator’s Guide*. SAS Institute Inc.
- Seethepalli, A., Dhakal, K., Griffiths, M., Guo, H., Freschet, G. T., & York, L. M. (2021). RhizoVision Explorer: open-source software for root image

analysis and measurement standardization. *AoB plants*, 13(6), Article plab056. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab056>.

- Shu, B., Liu, L., Jue, D., Wang, Y., Wei, Y., & Shi, S. (2017). Effects of avocado (*Persea americana* Mill.) scion on arbuscular mycorrhizal and root hair development in rootstock. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(12), 1951-1962. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1317921>
- Zeng, J., Liu, J., Lian, L., Xu, A., Guo, X., Zhang, L., Zhang, W., & Hu, D. (2022). Effects of scion variety on the phosphorus efficiency of grafted *Camellia oleifera* seedlings. *Forests*, 13(2), Article 203. <https://doi.org/10.3390/f13020203>.
- Zhou, Z., Yuan, Y., Wang, K., Wang, H., Huang, J., Yu, H., & Cui, X. (2022). Rootstock-scion interactions affect fruit flavor in grafted tomato. *Horticultural Plant Journal*, 8(4), 499-510. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2022.01.001>.

CAPÍTULO 5. ANATOMÍA RADICAL ADVENTICIA COMPARATIVA DE SEIS PORTAINJERTOS CLONALES DE AGUACATE⁵

Nancy Elena Gonzalez-Florez¹, Alejandro Facundo Barrientos-Priego^{1*},
María Teresa Beryl Colinas y Leon¹, Prometeo Sánchez García², Eduardo
Campos-Rojas¹, Blanca Berenice Flores-Espinosa³

¹Posgrado en Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5 carretera. México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, México. C.P. 56230.

²Colegio de Posgraduados, km. 36.5 carretera. México-Texcoco, Montecillo, Estado de México, México. C.P. 56264.

³Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias, Av. Universidad S/N. San Juan Acateno. Teziutlán, Puebla, México. C.P. 73695

*Autor para Correspondencia: abarrientosp@chapingo.mx

RESUMEN

El conocimiento anatómico del sistema radical en aguacate resulta fundamental para comprender su eficiencia fisiológica, su adaptación a condiciones edáficas y climáticas adversas. Este estudio tuvo como fin identificar diferencias anatómicas en cortes transversales de raíz adventicia de seis genotipos clonales de aguacate, uno de porte normal y el resto enanos. Se seleccionaron tres raíces por genotipo, a las que se les aplicaron técnicas de corte anatómico transversal y análisis microscópico. Los resultados revelaron que las raíces de los genotipos se encontraban en etapa de transición hacia crecimiento secundario o ya lo presentaban. Entre los genotipos evaluados 'Don Cris Enano' presentó mayor proporción de la estela, mientras que 'Misterioso' tuvo mayor frecuencia de xilema por mm² y 'Don Cris Enano' mostró mayor área de xilema. Estas diferencias estructurales podrían estar asociadas con distintos grados de eficiencia hídrica y tolerancia a estrés, relevantes para la selección de portainjertos adaptados a condiciones específicas de cultivo. Este estudio contribuye al entendimiento morfofuncional del sistema radical en aguacate y destaca la utilidad del análisis anatómico como criterio complementario en la evaluación de materiales clonales.

Palabras claves: *Persea americana* Mill., genotipos clonales, raíces, cortes anatómicos.

⁵ Sometido a: Sin someter
Estatus: No enviado

5.1. Introducción

El estudio anatómico del sistema radical puede representar una herramienta esencial para comprender la funcionalidad fisiológica de las plantas y su adaptación a condiciones de estrés ambiental. En especies perennes como el aguacate, las raíces no solo participan en la absorción de agua y nutrientes, sino que también son determinantes en la tolerancia a sequía, el anclaje estructural y la interacción simbiótica con el suelo (Wolstenholme, 2002). A pesar de esta importancia, el sistema radical del aguacate ha sido poco estudiado, aun cuando se ha descrito como un sistema poco profundo y extendido superficialmente en el área de proyección de la copa (Scora et al., 2002). Además, carece de pelos radicales, presenta un alto requerimiento de oxígeno y una captación de agua relativamente pobre, a pesar de su importancia en la absorción de nutrientes (Castro et al., 2008).

En las últimas dos décadas, diversos estudios han resaltado la relación entre los rasgos anatómicos de la raíz y la adaptación de los portainjertos a condiciones ambientales adversas. Características como el tamaño de la estela, la frecuencia de vasos de xilema y el grosor cortical, influyen directamente en la eficiencia del uso del agua (Fassio et al., 2020). Además, estos rasgos anatómicos no solo son indicadores de eficiencia fisiológica, sino también de adaptación a entornos productivos con recursos limitados (Clément et al., 2022), como se ha observado en la tolerancia diferencial a sequía de diversos portainjertos (Moreno-Ortega et al., 2021; Yamauchi et al., 2021).

El uso de portainjertos clonales se ha consolidado en países como Estados Unidos de Norteamérica, Sudáfrica e Israel, esto se debe a sus ventajas en homogeneidad, vigor y eficiencia agronómica. Sin embargo, en América Latina, su adopción es incipiente, pese a su gran potencial para el establecimiento de huertos en suelos marginales o en sistemas tecnificados como el fertirriego en contenedores (Barrientos-Priego, 2017; Meza-Castillo et al., 2018). En este contexto comprende el cómo la anatomía radicular varía entre cultivares propagados clonalmente y adquiere especial relevancia para

la selección de materiales con mayor eficiencia hídrica, resiliencia estructural y adaptabilidad.

La propagación clonal mediante enraizamiento de estacas, técnica favorecida por el uso de ácido indol-3-butírico (IBA), permite la formación de sistemas radicales más homogéneos, facilitado el análisis comparativo de rasgos anatómicos entre genotipos de durazno (Lesmes-Vesga et al., 2021). Se ha demostrado que las características morfológicas y anatómicas de las raíces están asociadas con mejoras en la eficiencia en el uso de agua y nutrientes, lo cual repercute directamente en la productividad (Fassio et al., 2016). En este sentido, los genotipos de porte normal y enanos representan modelos interesantes de estudio, ya que pueden diferir en su arquitectura radical y ofrecer ventajas agronómicas específicas.

Desde una perspectiva estructural, tallo, hojas y raíces se distinguen por la distribución relativa de sus tejidos vasculares. En el caso del ápice radical, éste carece de apéndices laterales como hojas o ramas, y crece longitudinalmente de manera uniforme (Evert, 2008). Asimismo, en aguacate se han descrito raíces proteiformes, caracterizadas por la emergencia endógena de raicillas desde el periciclo, opuestas a los radios de xilema y dispuestas en verticilos (Ramírez et al., 2004). Por otra parte, en condiciones de hipoxia se han observado respuestas anatómicas como cambios en la proporción xilema/floema, formación de aerénquima y desarrollo de raíces adventicias, todas ellas con impacto directo en la eficiencia hídrica y en el desempeño fisiológico del árbol (Gil et al., 2009). Estas particularidades morfoanatómicas hacen del aguacate una especie con gran plasticidad en su sistema radical y con potencial para generar adaptaciones diferenciales frente a condiciones de estrés.

En este estudio se analizó la anatomía radical de seis genotipos clonales de aguacate de porte normal y enanos, con el objetivo de identificar diferencias estructurales en la disposición de los tejidos. Este conocimiento permitirá inferir su potencial funcional como portainjertos y orientar la selección de materiales genéticos más eficientes y resilientes frente a condiciones productivas variables.

5.2. Materiales y métodos

Esta investigación se realizó en un invernadero del Departamento de Fitotecnia en el Campo Experimental Xaltepa de la Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.

5.2.1. Material vegetal

Se seleccionaron seis genotipos de aguacate propagados clonalmente por sus hábitos de crecimiento enano y se compararon con un genotipo de crecimiento normal (testigo) utilizado como portainjerto estándar (Cuadro 1).

Cuadro 8. Genotipos clonales de aguacate

Genotipo	Origen y Raza	Característica
'Duke 7'	California, EEUU.	Crecimiento normal con entrenudos de longitud media, árbol de tamaño alto (testigo).
'Fundación II'	Coatepec Harinas, Estado de México, México.	Crecimiento enano, entrenudos de longitud media, crecimiento lateral, pérdida de dominancia apical.
'San Martin'	Teziutlán, Puebla, México.	Crecimiento enano de entrenudos muy cortos y hojas pequeñas.
'Misterioso'	Coatepec Harinas, Estado de México, México.	Crecimiento enano con entrenudos muy cortos, árbol extremadamente pequeño.
'Colin V-33'	Ixtapan de la Sal, Estado de México, México.	Crecimiento enano, entrenudos de longitud media, crecimiento lateral extenso de las ramas, pérdida de dominancia apical, árbol pequeño.
'Don Enano'	Cris Tequexquinahuac, Estado de México, México.	Crecimiento enano de entrenudos cortos y hojas gruesas y rugosas.

Basados en el método de Frolich & Platt (1972) y la modificación de Ernst (1999) se clonaron los genotipos con el siguiente procedimiento: se produjo una planta de aguacate a partir de semilla y, cuando alcanzó un diámetro mayor a 6 mm, se realizó un injerto de hendidura simple con cada uno de los seis genotipos, pasados 40 días tras la unión completa del injerto, las plantas se colocaron en una cámara oscura a 30 °C y humedad relativa de 80 % para obtener brotes etiolados a partir de los injertos. Cuando estos alcanzaron una longitud aproximada de 15 - 20 cm, las plantas se sacaron de la cámara

oscura y se trasladaron a un invernadero con temperatura promedio de 17° C y una humedad relativa de 71.9 %, posteriormente en la base del brote etiolado se aplicó sal potásica de ácido indol-butírico a 7000 mg L⁻¹ a un pH 7 tras colocar un recipiente en la base del brote y recubrir con fibra de coco (Hydro Environment S.A. de C.V.; Tlalnepantla, México) como medio de enraizamiento. A los 90 días se separó el vástago enraizado de la planta nodriza y se trasplantó a contenedores de capacidad 50 L empleando tezontle como sustrato se utilizó un sistema de fertirriego por goteo con ocho emisores calibrados para suministrar 8 L h⁻¹, con una frecuencia de riego de 3 min cada 24 h y en invierno cada 48 h durante el año del experimento, ya que las necesidades hídricas eran menores en este último periodo debido a las temperaturas más bajas. La fórmula de nutrientes suministrada en mg L⁻¹ fue: 59 (N), 11 (P), 96 (K), 63 (Ca), 17 (Mg), 3 (Fe), 0.025 (Cu), 0.5 (Mn), 0.05 (Zn) y 0.5(B).

Transcurrido un año, cada planta se cosechó completamente y el sistema radical completo se colocó en contenedores de 50 L con agua corriente para eliminar completamente el sustrato, posteriormente, se tomaron muestras de tres raíces adventicias próximas a la base del tallo, de aproximadamente 2 mm de longitud, por cada repetición, con el fin de caracterizar sus rasgos anatómicos.

5.2.2. Anatomía de raíces

Los segmentos radicales se enjuagaron y limpiaron con agua destilada posteriormente se fijaron en una solución 2:1 (ácido acético glacial: alcohol) para su preservación.

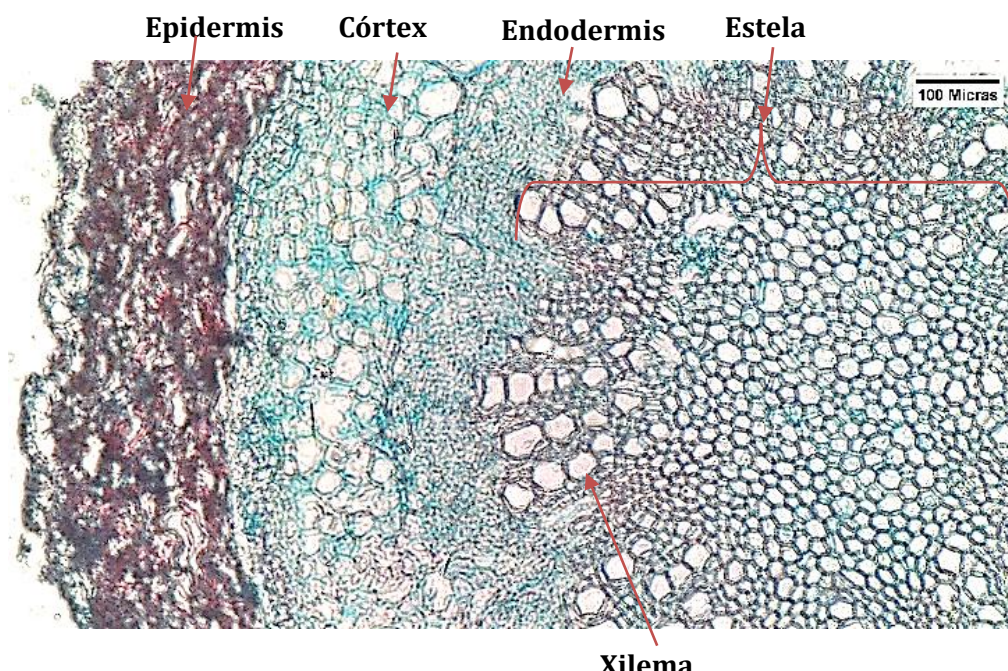
Los cortes histológicos se realizaron en el laboratorio de fisiología de frutales del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo siguiendo el protocolo de preparación de muestras para microscopía descrito por (Sandoval, 2005) que consistió en el enjuague de los tejidos con agua destilada posteriormente deshidratación progresiva con alcohol (50 %, 70 %, 96 %, y 100 % durante 30 min cada uno), seguido de aclaramiento con xileno (50 %, 100 % durante 20 min cada uno), luego en una estufa de secado a 60 °C se realizó una infiltración progresiva con xileno y paraplast 75:25 50:50

25:75 una hora por cada uno y se dejó infiltrado con paraplast al 100 % durante 56 h, posteriormente se realizó el encapsulamiento donde se dejó enfriar por 24 h, se elaboró el taquete y pirámide de parafina. En este se realizaron cortes transversales de un grosor de 15 μm en un micrótopo (Thermo scientific HM325), los cortes se depositaron en un baño de flotación que se encontraba entre 40 a 50 °C para su estiramiento, al agua se le adicionó grenetina para adherir los cortes en el portaobjeto, posteriormente el portaobjeto se ubicó en una caja de forma vertical para retirar el exceso de agua durante 24 h. Para el desparafinado se deposita el portaobjetos a un horno de secado a 60 °C por 30 min al sacar el portaobjeto del horno se colocó inmediatamente en xileno durante 20 min, luego se pasó a solución xileno:alcohol absoluto (1:1 volumen) por 15 min. Para la tinción se hidrataron los tejidos mediante alcohol (100 %, 96 %, 70 %, 50 % durante 15 min en cada paso), se tiñó con safranina por 5 min, se realizó triple lavado con agua destilada por un minuto cada uno. La deshidratación se realizó con alcohol (50 %, 70 %, 96 %, 100 %, doble inmersión durante dos minutos en cada etapa), se tiñó con “fast green, 1 min, doble enjuague con alcohol absoluto por un minuto e inmersión en xileno por tres minutos. Una vez teñidos los cortes se hicieron preparaciones fijas con un medio de montaje Entellan® Merck.

Las imágenes de los cortes se capturaron con una cámara 4K ULTRA HD adaptada a un microscopio óptico de fluorescencia (Olympus BX53), dónde se tomaron fotografías a 4X y cinco campos visuales a 10X por repetición.

5.2.3. Programa de análisis y medición de imágenes

Las imágenes obtenidas se analizaron con el programa de análisis y procesamiento de imágenes ImageJ (Bràmoft et al., 2004), Se calcularon las siguientes variables: Imágenes con aumento de 4X: diámetro de raíz (μm), medición de área de los diferentes tejidos y sus proporciones en porcentaje (Figura 1). Además de imágenes con aumento de 10X: Frecuencia de elementos de vaso de xilema por mm^2 y área de xilema (μm^2).



Xilema

Figura 6. Sección transversal de raíz adventicia de aguacate 'Fundación II' clonal (10X).

5.2.4. Repeticiones, diseño experimental y análisis estadístico

Se empleó un diseño completamente al azar con seis tratamientos (genotipos) y tres repeticiones. Por cada repetición se tomaron tres raíces adventicias, los datos obtenidos de la medición de las imágenes se analizaron mediante análisis de varianza, comparaciones de media de Tukey ($P \leq 0.05$) y análisis de correlación de Pearson con el programa estadístico SAS versión 9.4 (SAS., 2023).

5.3. Resultados

Las raíces de los seis genotipos de aguacate evaluados presentaron crecimiento secundario, lo que evidenció la formación de tejidos vasculares secundarios (xilema y floema) y el engrosamiento progresivo de la raíz primaria, tal como se observó en la (Figura 2). Para la variable diámetro de raíces, no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los genotipos analizados. Sin embargo, se apreció una tendencia en la que 'Colin V-33' presentó el mayor diámetro promedio, mientras que 'San Martin' mostró el menor (Figura 3).

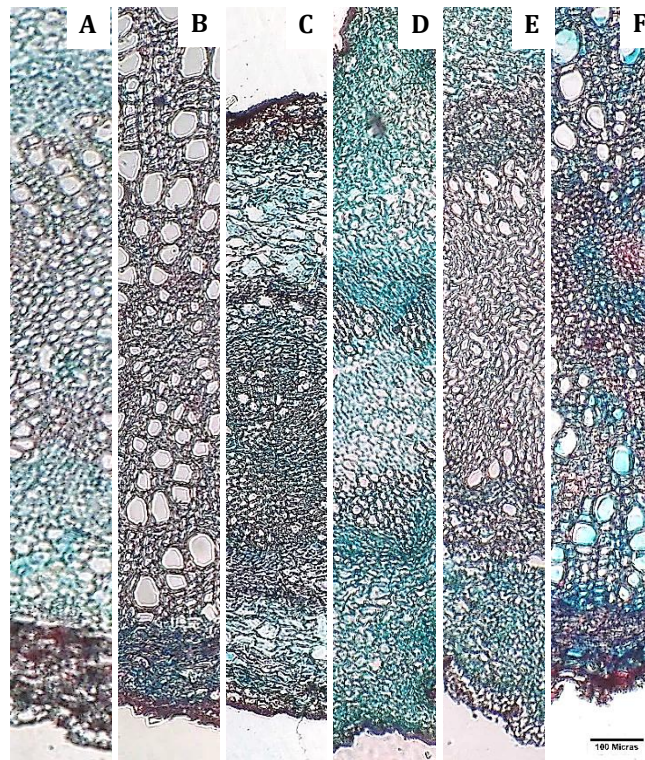


Figura 7. Secciones transversales de raíz adventicia de seis genotipos de aguacate. A) 'Duke 7', B) 'Fundación II', C) 'San Martín', D) 'Misterioso', E) 'Colin V-33' y F) 'Don Cris Enano', Escala de 100 micras.

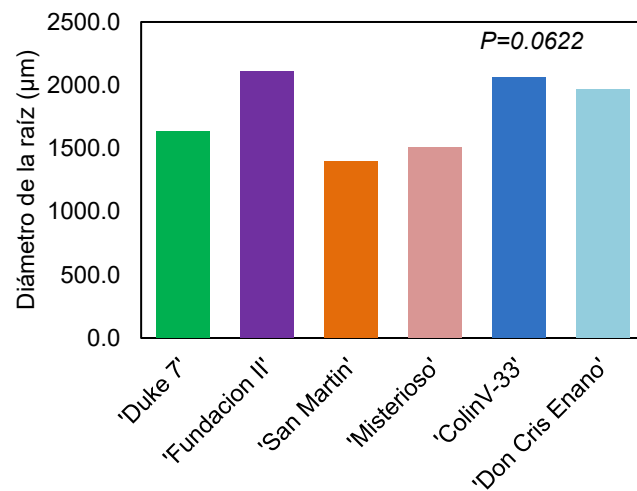


Figura 8. Diámetro de raíz adventicia de seis genotipos de aguacate propagados clonalmente.

La proporción de la epidermis en las raíces de los seis genotipos de aguacate evaluados no presentó diferencias estadísticas significativas. No obstante, en la (Figura 4A) se aprecia una ligera variación entre los genotipos, donde ‘Colin V-33’ presentó la mayor proporción, mientras que ‘San Martín’ mostró el valor más bajo. Es importante señalar que la proporción de cada uno de los tejidos se estimó a partir de la medición de su diámetro.

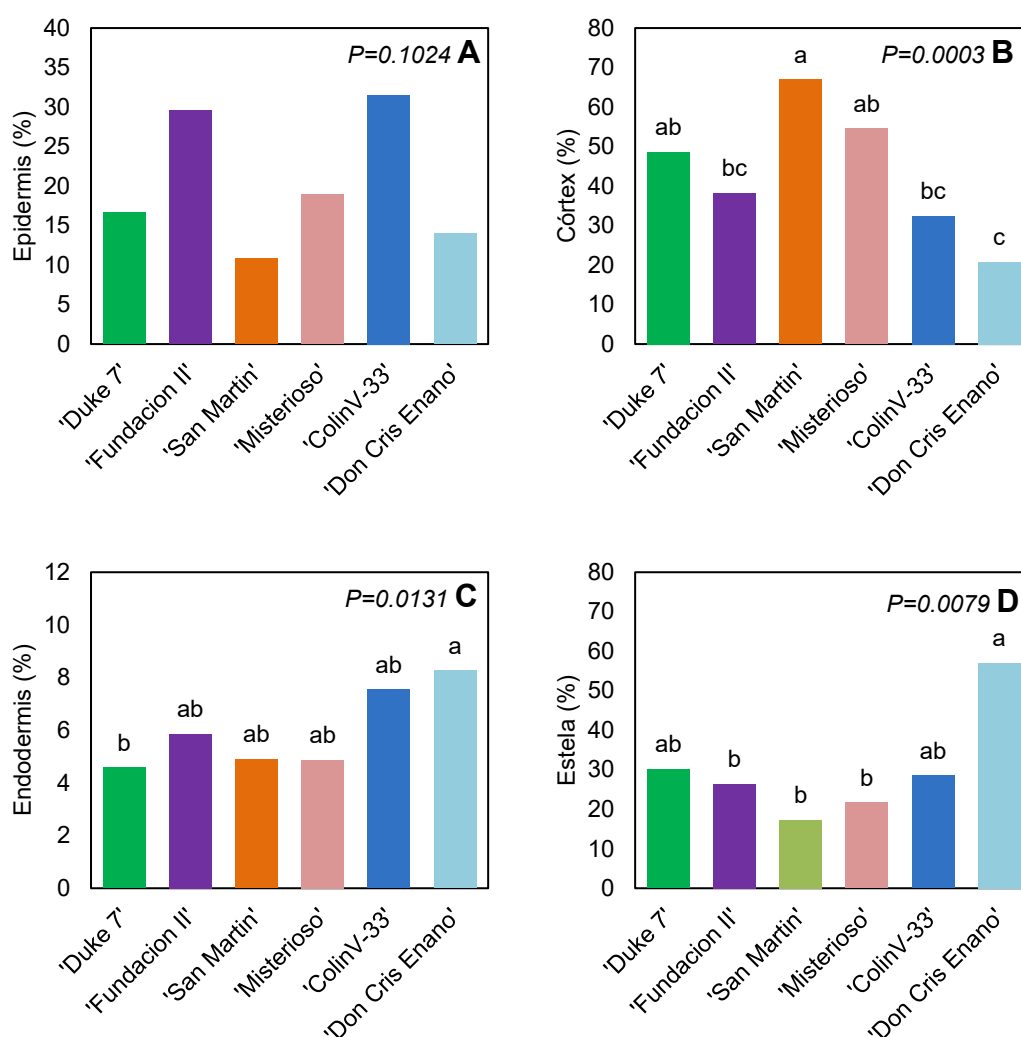


Figura 9. Proporciones de raíz adventicia de seis genotipos de aguacate clonados. A) Epidermis, B) Cortez, C) Endodermis y D) Estela. Las letras indican valores diferentes según la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

En cuanto a proporción del córtex, se observaron diferencias estadísticas significativas entre 'San Martin' el cual presentó la mayor proporción y 'Don Cris Enano' con el valor más bajo, por su parte, 'Duke 7', 'Fundación II', 'Misterioso' y 'Colin V-33' no mostraron diferencias estadísticas entre sí (Figura 4B).

La proporción de la endodermis fue mayor para 'Don Cris Enano' con diferencias estadísticas significativas respecto a 'Duke 7' que presentó el menor valor, mientras que 'Fundación II', 'San Martin', 'Misterioso' y 'Colin V-33' no mostraron diferencias estadísticas entre sí, a su vez son estadísticamente iguales a 'Don Cris Enano' (Figura 4C).

'Don Cris Enano' con el valor más alto fue estadísticamente diferente a 'Fundación II', 'San Martin' y 'Misterioso' en proporción de la estela (Figura 4D), mientras que 'Duke 7' y 'Colin V-33' fueron estadísticamente iguales a 'Don Cris Enano'.

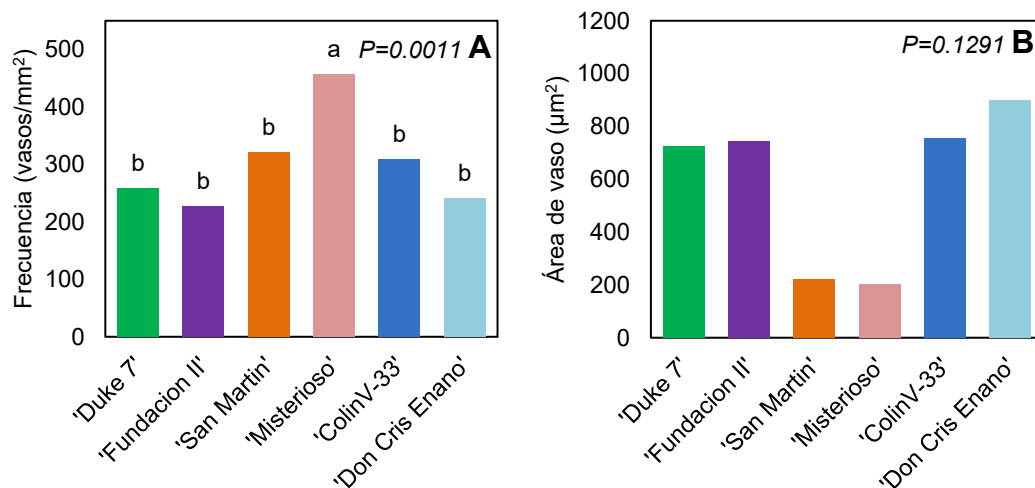


Figura 10. Frecuencia y área de elementos de vaso de xilema en raíces adventicias de seis genotipos de aguacate clonados. Las letras indican valores diferentes según la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

'Misterioso' presentó la mayor frecuencia de elementos de vaso de xilema por mm^2 , siendo estadísticamente diferente a los demás genotipos (Figura 5A), en cuanto al área de elemento de vaso, no se encontraron diferencias

significativas entre genotipos; sin embargo, se aprecia una tendencia en la que 'Don Cris Enano' mostró los vasos con mayor área, mientras que 'Misterioso' presentó la menor área (Figura 5B).

5.4. Discusión

El análisis anatómico de raíces adventicias de los seis genotipos clonales de aguacate evidenció crecimiento secundario en las raíces, el cual va relacionado con la edad del portainjerto, con formación de tejidos vasculares secundarios (xilema y floema) y engrosamiento progresivo, lo cual coincidió con descripciones previas sobre el desarrollo morfoanatómico de raíces en *Persea americana* (Fassio et al., 2007). Este patrón confirmó la capacidad de los portainjertos clonales para establecer sistemas radicales funcionales con diferenciación vascular completa, aspecto relevante en su desempeño fisiológico.

En cuanto al diámetro de raíz, aunque no se detectaron diferencias significativas entre los genotipos, la tendencia observada con 'Colín V-33' con el mayor diámetro y 'San Martín' el menor resultó consistente con la variabilidad encontrada en portainjertos clonales respecto al grosor de raíces adventicias y secundarias (Fassio et al., 2009). Dado que diámetros mayores pueden asociarse a mayor capacidad de conducción hídrica, la tendencia de 'Colín V-33' se relaciona con lo indicado por Reyes-Santamaría et al. (2025), quienes encontraron que este genotipo, en combinación con diferentes injertos, mostró mayor eficiencia en el uso del agua bajo déficit hídrico.

Respecto a la proporción cortical, se observaron diferencias significativas entre genotipos, donde 'San Martín' presentó la mayor proporción y 'Don Cris Enano' la más baja. Este hallazgo es particularmente relevante, ya que estudios previos sugieren que un córtex más amplio puede limitar la eficiencia en la conducción de agua y nutrientes debido a una mayor distancia radial hasta el cilindro vascular (Reyes-Santamaría et al., 2002). Por lo que el menor grosor cortical de 'Don Cris Enano' podría interpretarse como una ventaja adaptativa en condiciones de estrés hídrico, tal como lo ha indicado Flores-Espinosa et al. (2021), al encontrar que mayor proporción de xilema y menor

de corteza en portainjertos de aguacate con tolerancia a sequía, aunque esta hipótesis requiere validación fisiológica.

La proporción de la endodermis fue significativamente mayor en 'Don Cris Enano' en comparación con 'Duke 7', que mostró el valor más bajo. Dado que la endodermis funciona como barrera de control en la absorción de agua y solutos, su mayor proporción podría representar un mecanismo anatómico de regulación diferencial entre genotipos. De manera similar, la variación en la proporción de la estela, con valores más altos en 'Don Cris Enano', lo cual puede implicar que un mayor desarrollo de tejidos vasculares se traduce en diferencias de flujo de savia y eficiencia hídrica (Fassio et al., 2009).

En lo referente a la anatomía de xilema, se encontró que 'Misterioso' presentó la mayor frecuencia de vasos por mm², aunque con área promedio menor, mientras que 'Don Cris Enano' mostró vasos de mayor área. La mayor frecuencia de elementos de vaso de xilema se ha asociado con plantas de porte bajo (Useche-Carrillo et al., 2021), por otra parte, se ha encontrado que genotipos de aguacate con vasos más estrechos presentan menor vulnerabilidad a la cavitación, mientras que aquellos con vasos más anchos pueden favorecer mayor flujo de agua, pero con mayor susceptibilidad al colapso bajo déficit hídrico (Reyes-Santamaría et al., 2002). De este modo, 'Misterioso' podría estar mejor adaptado a condiciones de sequía, mientras que 'Don Cris Enano' pudiera manifestar un desempeño superior en ambientes con disponibilidad hídrica adecuada.

5.5. Conclusiones

Las características anatómicas evaluadas en seis genotipos clonales de aguacate evidencian que la proporción cortical, la estela, la frecuencia y el área de los vasos de xilema, así como la proporción de la endodermis, son rasgos estructurales relevantes para inferir en la eficiencia hídrica y la resiliencia de los portainjertos. Genotipos como 'Colín V-33' y 'Misterioso' destacaron por presentar atributos anatómicos asociados a mayor eficiencia de conducción y a mayor seguridad hidráulica, respectivamente, lo que los posiciona como materiales con potencial para enfrentar escenarios productivos de variabilidad hídrica. Estos hallazgos contribuyen a

fundamentar la selección informada de portainjertos clonales en aguacate y puede favorecer el desarrollo de sistemas de cultivo más eficientes y adaptados a condiciones adversas.

5.6. Literatura citada

- Barrientos-Priego, A. F. (2017). Presente y futuro de los portainjertos y variedades de aguacate en el mundo y México. In S. Salazar-García & A. F. Barrientos-Priego (Eds.). *Memorias del V congreso latinoamericano del aguacate* (pp. 2-15). Asociación de Productores y Exportadores de Jalisco, A.C. (APEAJAL).
- Bràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, 11(7), 36–42.
- Castro, M., Fassio, C., & Darrouy, N. (2008). Portainjertos de aguacate en Chile. *Horticultura Internacional*, 62, 42-46.
- Clément, C., Schneider, H. M., Dresbøll, D. B., Lynch, J. P., & Thorup-Kristensen, K. (2022). Root and xylem anatomy varies with root length, root order, soil depth, and environment in intermediate wheatgrass (Kernza®) and alfalfa. *Annals of Botany*, 130(3), 367-382. <https://doi.org/10.1093/aob/mcac058>.
- Ernst, A. A. (1999). Micro cloning: a multiple cloning technique for avocados using micro containers. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 217-220.
- Evert, R. F. (2008). *Esau anatomía vegetal: meristemas, células y tejidos de las plantas: su estructura, función y desarrollo*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Fassio, C., Cautin, R., Perez-Donoso, A. G., Castro, M., & Banomelli C. (2020). Comparative branching order and root anatomy of clonal and seedgrown avocado trees (*Persea americana* Mill.). *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 47(2), 134-144. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v47i2.2240>.
- Fassio, C., Cautin, R., Pérez-Donoso, A., Bonomelli, C., & Castro, M. (2016). Propagation Techniques and Grafting Modify the Morphological Traits of Roots and Biomass Allocation in Avocado Trees. *Horttechnology* 26(1), 63-69. <https://doi.org/10.21273/horttech.26.1.63>.
- Fassio, C., Heath, R., Arpaia, ML y Castro, M. (2009). Sap flow in 'Hass' avocado trees on two clonal rootstocks in relation to xylem anatomy. *Scientia Horticulturae*, 120(1), 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.09.012>.
- Fassio, C., Castro, M., Darrouy, N., & Mamani, J. (2007). Anatomical and morphological characterization of roots of seedling and clonal avocado (*Persea americana* Mill.) rootstocks. In *Proceedings VI World Avocado Congress*. Universidad Pontificia de Valparaíso.
- Flores-Espinosa, B. B., Domínguez-Perales, L. A., Sánchez-Sánchez, J., Reyes-Quiroz, C., & Barrientos-Priego, A. F. (2021). Relaciones

- anatómicas de xilema con tolerancia a sequía en portainjertos de aguacate. In Barrientos-Priego, A. F. (Ed.), *Memorias del VI Congreso Latinoamericano del Aguacate. 9 - 12 de noviembre 2021* (pp. 27-36). Asociación Guatemalteca de Exportadores AGEXPORT.
- Frolich, E., & Platt, R. (1972). Use of the etiolation technique in rooting avocado cuttings. *California Avocado Society Yearbook* 55, 97-109.
- Gil, P. M., Ferreyra, R., Barrera, C., Zúñiga, C., & Gurovich, L. (2009). Effect of injecting hydrogen peroxide into heavy clay loam soil on plant water status, net CO₂ assimilation, biomass, and vascular anatomy of avocado trees. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69(1), 97-106. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392009000100012>.
- Lesmes-Vesga, R. A., Chaparro, J. X., Sarkhosh, A., Ritenour, M. A., Cano, L. M., & Rossi, L. (2021). Effect of propagation systems and indole-3-butyric acid potassium salt (K-IBA) concentrations on the propagation of peach rootstocks by stem cuttings. *Plants* 10(6), Article 1151. <https://doi.org/10.3390/plants10061151>.
- Meza-Castillo, E., Barrientos-Priego, A. F., Rodríguez-Pérez, J. E., Reyes-Alemán, J. C., Borys, M. W., & Espíndola-Barquera, M. C. (2018). Caracterización morfológica e histológica de ápices de raíz de portainjertos de aguacate y su resistencia a factores adversos en el suelo. *Bioagro* 30(2), 107-116. <https://revistas.uclave.org/index.php/bioagro/article/view/423>.
- Moreno-Ortega, G., Zumaquero, A., Matas, A., Nicholas, A. O., van den Berg, N., Palomo-Ríos, E., Martínez-Ferri, E., & Pliego, C. (2021). Physiological and molecular responses of 'Dusa' avocado rootstock to water stress: Insights for drought adaptation. *Plants*, 10(10), Article 2077. <https://doi.org/10.3390/plants10102077>.
- Ramírez, C., Valenzuela, E., & Cristina San Martín, P. (2004). Nuevos antecedentes sobre desarrollo temprano, morfología y anatomía de las raíces proteiformes de *Gevuina avellana*. *Agro Sur*, 32(2), 33-44. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2004.v32n2-04>.
- Reyes-Santamaría, I., Terrazas, T., Barrientos-Priego, AF, & Trejo, C. (2002). Xylem conductivity and vulnerability in cultivars and races of avocado. *Scientia Horticulturae*, 92(2), 97-105. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(01\)00284-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(01)00284-9).
- Reyes-Santamaría, MI, Trejo, C., Barrientos-Priego, AF, y Terrazas, T. (2025). Rootstock and scion interactions under conditions of soil water deficit in avocado. *Agroecosistemas Tropicales y Subtropicales*, 28(1), Article 021. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5313>.
- Sandoval, E. (2005). *Técnicas aplicadas al estudio de la anatomía vegetal*. Cuadernos del Instituto de Biología 38. Universidad Autónoma de México.
- SAS. (2023). *SAS® Studio 3.8: Administrator's guide*. SAS Institute Inc.

- Scora, R. W., Wolstenholme, B. N., & Lavi, U. (2002). Taxonomy and botany. In A. W. Whiley, B. Schaffer, & B. N. Wolstenholme (Eds.), *The avocado: botany, production and uses* (pp. 15–37). CABI Publishing.
- Useche-Carrillo, N. V., Barrientos-Priego, A. F., Núñez-Colín, C. A., Campos-Rojas, E., & Ayala-Arreola, J. (2021). Stem and leaf anatomical and physiological characteristics of ‘Colín V-33’ avocado seedlings. *Advances in Horticultural Science*, 35(2), 183-194. <https://doi.org/10.36253/ahsc-7493>.
- Wolstenholme, B. N. (2002). Ecology: Climate and the edaphic environment. In A. W. Whiley, B. Schaffer, & B. N. Wolstenholme (Eds.), *The avocado: botany, production and uses* (pp. 71–99). CABI Publishing.
- Yamauchi, T., Noshita, K., Noshita, K., & Tsutsumi, N. (2021). Climate-smart crops: key root anatomical traits that confer flooding tolerance. *Breeding Science*, 71(1), 51-61, <https://doi.org/10.1270/jsbbs.20119>
- Bràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, 11(7), 36–42.