Acta Agrícola y Pecuaria 12: e0121038. | e-ISSN: 2395-874X.
https://doi.org/10.30973/aap/2026.12.0121038 (18 de noviembre de 2026)

ARTÍCULO DE REVISIÓN

# Selección de portainjertos en manzano (*Malus domestica* Borkh.) para sistemas productivos en Cuauhtémoc, Chihuahua, México

Selection of apple rootstocks (*Malus domestica* Borkh.) for productive systems in Cuauhtemoc, Chihuahua, Mexico

**Rafael Ángel Parra-Quezada[1], Oscar Cruz-Alvarez[1], Juan Luis Jacobo-Cuellar[1], Miriam Jazmín Aguilar-Delgado[2], María Noemí Frías Moreno[1*]**

[1] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Av. Pascual Orozco s/n, Campus 1, Santo Niño, 31200, Chihuahua, Chihuahua, México.

[2] Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Antonio García Cubas 600, Fovissste, 38010, Celaya, Guanajuato, México.

* Autor para correspondencia: nfrias@uach.mx

**Fecha de recepción:**
30 de abril de 2026

**Fecha de aceptación:**
14 de julio de 2026

**Disponible en línea:**
18 de noviembre de 2026

**Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.**

**Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**

**Cómo citar:**
Parra-Quezada, R. Á., Cruz-Alvarez, O., Jacobo-Cuellar, J. L., Aguilar-Delgado, M. J., & Frías Moreno, M. N. (2026). Selección de portainjertos en manzano (*Malus domestica* Borkh.) para sistemas productivos en Cuauhtémoc, Chihuahua, México. *Acta Agrícola y Pecuaria, 12*, e0121038. https://doi.org/10.30973/aap/2026.12.0121038

## RESUMEN

Los portainjertos de manzano (*Malus domestica* Borkh.) determinan vigor, precocidad y tolerancia a estreses bióticos y abióticos, aspectos críticos en Cuauhtémoc, Chihuahua, México, por su clima semiárido y alta variabilidad. Se realizó una revisión crítica de literatura científica indexada y estudios regionales para evaluar el desempeño agronómico, fisiológico y fitosanitario de las principales series utilizadas a nivel mundial, integrando evidencia del programa NC-140 y de investigaciones de Europa, América, Asia y Oceanía. Las series Malling (M.9, M.26 y M.7), Budagovsky (B.9) y Geneva (G.11, G.41, G.935, G.202 y G.969) provienen de programas de mejoramiento; la serie Geneva destaca por su resistencia a patógenos, estabilidad productiva y aporte a la calidad del fruto. La selección debe considerar la interacción variedad-portainjerto, sistema de conducción, condiciones edafoclimáticas, presión fitosanitaria y objetivos productivos. Se proponen criterios prácticos para la toma de decisiones en sistemas intensivos bajo condiciones semiáridas.

## PALABRAS CLAVE

Manejo de huertos, sistemas semiáridos, enfermedad de replante, resistencia a *Erwinia amylovora*.

## ABSTRACT

Apple rootstocks (*Malus domestica* Borkh.) determine vigor, precocity, and tolerance to biotic and abiotic stresses, which are critical aspects in Cuauhtemoc, Chihuahua, Mexico, due to its semiarid climate and high variability. A critical review of indexed scientific literature and regional studies was conducted to evaluate the agronomic, physiological, and phytosanitary performance of the main series used worldwide, integrating evidence from the NC-140 program and research from Europe, the Americas, Asia, and Oceania. The Malling (M.9, M.26, M.7), Budagovsky (B.9), and Geneva (G.11, G.41, G.935, G.202, G.969) series originate from breeding programs; the Geneva series stands out for its pathogen resistance, productive stability, and contribution to fruit quality. Selection should consider the scion-rootstock interaction, training system, edaphoclimatic conditions, phytosanitary pressure, and production objectives. Practical criteria are proposed for decision-making in intensive systems under semiarid conditions.

## KEYWORDS

Orchard management, semiarid systems, replant disease, resistance to *Erwinia amylovora*.

## Introducción

La selección del portainjerto en manzano (*Malus domestica* Borkh.) constituye una decisión determinante en el establecimiento de huertos comerciales, debido a su influencia sobre la arquitectura del árbol, la productividad, la calidad del fruto y la sostenibilidad del sistema (Lawrence et al., 2025). Más allá de su función estructural, el portainjerto regula procesos clave como el vigor, la precocidad productiva, la arquitectura radicular, la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes, la calidad del fruto y la tolerancia a estreses bióticos y abióticos.

Las principales series de portainjertos utilizadas actualmente en la fruticultura comercial, Malling, Budagovsky y Geneva, fueron desarrolladas mediante trabajos de selección y mejoramiento genético en Inglaterra, Rusia y Estados Unidos, respectivamente (Lawrence et al., 2025). Estas series incluyen selecciones clonales y, en algunos casos, cruzamientos interespecíficos dentro del género *Malus*, desarrollados para incorporar características agronómicas que mejoran el desempeño productivo y la adaptación del cultivo a diferentes condiciones de producción. Hasta donde se tiene registro, en México se utilizan portainjertos pertenecientes a series internacionales, como Malling, Malling-Merton, Budagovsky y Geneva, cuyo comportamiento se ha evaluado bajo condiciones de Cuauhtémoc, Chihuahua. La evaluación regional de estos materiales permite generar información para orientar su selección y manejo frente a limitaciones ambientales, como el déficit hídrico (Rascón-Castillo et al., 2024).

En las últimas décadas, programas multilocales como NC-140 han generado evidencia robusta sobre el comportamiento de distintas series de portainjertos en diversos ambientes, destacando Malling, Budagovsky y Geneva (Autio et al., 2020; Auvil et al., 2011; Reig et al., 2020). La serie Malling ha sido ampliamente utilizada por su capacidad para inducir enanismo y precocidad; la serie Budagovsky presenta ventajas relativas bajo condiciones restrictivas, mientras que la serie Geneva destaca por incorporar resistencia genética a patógenos de importancia económica y una mayor estabilidad productiva, particularmente en condiciones de replante (Autio et al., 2020; Rufato et al., 2021). En Oceanía, la investigación sobre portainjertos de manzano también ha generado aportaciones relevantes. En Nueva Zelanda, inicialmente se recomendó MM.106 para suelos fértiles y se documentó un mejor anclaje de MM.104, MM.105 y MM.106 respecto a otros portainjertos (McKenzie, 1985). Más recientemente, nuevos portainjertos semienanizantes (PFR2, PFR4 y PFR5) han mostrado un desarrollo vegetativo y una arquitectura del dosel comparables a G.202 y superiores a M.9 durante la etapa de vivero, reflejando el avance de los programas de mejoramiento genético en la región (Dayatilake et al., 2025).

El desempeño del portainjerto no puede entenderse de manera aislada. En los sistemas intensivos de producción, su efecto se expresa en interacción con el sistema de conducción y la variedad injertada, condicionando la estructura del dosel, la eficiencia en la intercepción de la radiación y la productividad del huerto (Hassanzai & Ayobi, 2025). Esta interacción adquiere especial relevancia en plantaciones de alta densidad, donde el equilibrio entre vigor, arquitectura y manejo determina tanto el rendimiento como la calidad del fruto.

En regiones manzaneras de México, como Cuauhtémoc, Chihuahua, la disponibilidad limitada de agua constituye una restricción para la producción de manzano (Rascón-Castillo et al., 2024). Asimismo, la experiencia de campo de los autores permite reconocer que algunos huertos presentan condiciones edáficas restrictivas y antecedentes de replante que deben considerarse al establecer nuevas plantaciones. En este contexto, la selección del portainjerto requiere un enfoque específico que integre las condiciones ambientales y del suelo, el sistema de conducción, la variedad y los objetivos productivos, con el fin de optimizar el uso de los recursos y fortalecer la resiliencia del sistema.

El presente trabajo integra evidencia científica internacional y regional mediante un análisis comparativo de las principales series de portainjertos utilizadas en manzano, con énfasis en su respuesta fisiológica, productiva y sanitaria bajo condiciones semiáridas. Asimismo, propone criterios técnicos para apoyar la selección de portainjertos en sistemas productivos de Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

## Metodología

Se realizó una revisión de literatura mediante una búsqueda estructurada en las bases de datos Web of Science

(Core Collection), Scopus (Elsevier), ScienceDirect y SpringerLink, complementada con Google Scholar para identificar literatura regional y publicaciones de difícil recuperación en bases indexadas. La selección de literatura consideró estudios desarrollados en las principales regiones productoras de manzano, incluyendo América, Europa, Asia y Oceanía, con énfasis en investigaciones realizadas en Australia y Nueva Zelanda, debido a su relevancia en sistemas intensivos y condiciones contrastantes de producción.

Las estrategias de búsqueda incluyeron combinaciones de los términos *apple rootstock*, *Malling*, *Budagovsky*, *Geneva*, *fruit quality*, *replant disease*, *fire blight resistance* y *semi-arid systems*, utilizando operadores booleanos de acuerdo con las características de cada base de datos.

Se priorizaron artículos científicos revisados por pares y estudios experimentales publicados en inglés y español. Los criterios de inclusión consideraron investigaciones con información relacionada con el desempeño agronómico, fisiológico, fitosanitario y la calidad del fruto en portainjertos de manzano. Se excluyeron documentos duplicados, resúmenes de congresos, literatura sin revisión por pares y publicaciones cuyo contenido no estuviera directamente relacionado con los objetivos de esta revisión.

La revisión se desarrolló mediante un enfoque narrativo, comparativo y crítico. Las fuentes se seleccionaron por su pertinencia temática y su contribución al análisis del desempeño de las principales series de portainjertos bajo diferentes condiciones ambientales, sistemas de manejo y combinaciones portainjerto-variedad. El análisis permitió identificar tendencias consistentes, discrepancias entre estudios, limitaciones y vacíos de conocimiento relevantes para la selección de portainjertos en sistemas intensivos establecidos bajo condiciones semiáridas. Las publicaciones incluidas abarcaron el período de 1985 a 2026. En total, la revisión integró 64 referencias bibliográficas.

## Resultados y discusión

### Bases agronómicas

El vigor del portainjerto condiciona la densidad de plantación y la eficiencia lumínica: los enanizantes favorecen precocidad y sistemas intensivos, mientras que los más vigorosos se adaptan mejor a suelos restrictivos o con baja disponibilidad hídrica (Robinson, 2011). La eficiencia productiva, medida como rendimiento por área de sección transversal del tronco (TCSA), depende de la densidad y del balance fisiológico del dosel (Reig et al., 2020).

La tolerancia a la enfermedad de replante del manzano (Apple Replant Disease, ARD) y la resistencia genética a patógenos como *Erwinia amylovora* y *Phytophthora* spp. son determinantes para la resiliencia del sistema y la reducción en el uso de productos químicos (Marini & Fazio, 2018; Norelli et al., 2002; Robinson et al., 2012). Además, el portainjerto modula la calidad del fruto mediante la absorción de nutrientes y la regulación hormonal, influyendo en el tamaño, la firmeza y la coloración; una mayor absorción de calcio se asocia con una menor incidencia de *bitter pit* (Nava et al., 2018). En ambientes semiáridos, la eficiencia en el uso del agua y la arquitectura radicular constituyen factores clave para la sostenibilidad del sistema productivo (Song et al., 2020).

### Interacción portainjerto-sistema de conducción-variedad

La modernización de los huertos de manzano depende de la integración entre el portainjerto, el sistema de conducción y la variedad injertada. En nuevas plantaciones se han implementado sistemas de conducción de alta densidad, como Tall Spindle, Super Spindle, Bi-Baumm®, Doble Bi-Baumm®, V/Y Trellis y los sistemas de múltiples líderes. Estos sistemas buscan optimizar la interceptación de la radiación, mejorar la distribución del dosel, favorecer la calidad del fruto y facilitar las labores de poda, manejo y cosecha (Hampson et al., 2002; Ladon et al., 2022; Stănică, 2019; Yang et al., 2021). Su implementación requiere portainjertos de bajo vigor y una adecuada interacción entre el material vegetal, el sistema de conducción y las condiciones del sitio. En la región manzanera de Cuauhtémoc, Chihuahua, el sistema Tall Spindle ha sustituido progresivamente al sistema tradicional de líder central en las nuevas plantaciones durante los últimos años, mientras que sistemas como Bi-Baumm®, Doble Bi-Baumm®, V/Y Trellis y los de múltiples líderes representan alternativas de adopción más reciente, orientadas a incrementar la eficiencia en el uso de la mano de obra, optimizar el aprovechamiento

del espacio y mejorar la estabilidad del rendimiento y la calidad del fruto. El desempeño de portainjertos de las series Malling y Geneva bajo conducción Tall Spindle ha sido evaluado en ensayos multilocales de largo plazo, con diferencias en vigor, rendimiento y eficiencia productiva entre materiales (Autio et al., 2020). Estos resultados aportan elementos para seleccionar combinaciones portainjerto-variedad compatibles con el sistema de conducción; su aplicación en Cuauhtémoc debe contrastarse con las condiciones ambientales y de manejo locales.

**Variedades vigorosas** (p. ej., Granny Smith) requieren portainjertos enanizantes o semienanizantes, como B.9 y M.9, para moderar el crecimiento vegetativo, favorecer una entrada temprana en producción y mejorar la eficiencia productiva. G.11 constituye una alternativa que permite mantener un adecuado equilibrio entre vigor y rendimiento (Gjamovski & Kiprijanovski, 2011; Ladikou et al., 2025; Lawrence et al., 2025; Xu & Ediger, 2021).

**Variedades de bajo vigor** (p. ej., Honeycrisp) se benefician de portainjertos de mayor vigor relativo, como G.41 y G.935, los cuales favorecen una mayor uniformidad de brotación y tolerancia al estrés. Estas respuestas también han sido documentadas en evaluaciones realizadas en Cuauhtémoc, Chihuahua, bajo condiciones regionales (Cruz-Alvarez et al., 2025 ).

**Variedades de vigor intermedio** (p. ej., Golden Delicious) logran un equilibrio entre rendimiento y calidad del fruto con portainjertos como G.11, G.202, CG.4013 y M.26 (Czynczyk & Bielicki, 2012). En Cuauhtémoc, Chihuahua, materiales como M.26 y otros portainjertos de las series Malling y Geneva han sido evaluados bajo condiciones locales, confirmando su potencial para sistemas intensivos de producción (Romero Domínguez et al., 2027).

Con base en estas interacciones, la selección del portainjerto debe ajustarse al vigor de la variedad y al sistema de conducción empleado, ya que cada combinación presenta ventajas y limitaciones en términos de crecimiento, productividad, calidad del fruto y adaptación al ambiente. A continuación, se describen las principales características de los portainjertos enanizantes y de vigor intermedio en función de su desempeño en los sistemas de conducción más utilizados.

**Portainjertos enanizantes en sistemas de alta densidad (M.9, G.11, G.41)**: Los portainjertos enanizantes, como M.9, G.11 y G.41, se adaptan a sistemas de conducción de alta densidad, como Tall Spindle y Super Spindle, al favorecer una entrada temprana en producción, una mayor eficiencia productiva y un mejor aprovechamiento del espacio. Ensayos realizados en Nueva York demostraron que densidades superiores a 3,000 árboles $ha^{-1}$ maximizan el valor actual neto a 20 años, aunque la respuesta varía según la variedad, destacando Honeycrisp y Gala (Gonzalez Nieto et al., 2023; Ho et al., 2024). En Honeycrisp, los portainjertos G.41 y G.935 favorecen una mayor uniformidad de brotación y una mejor tolerancia al estrés hídrico, mientras que, en Golden Delicious Reinders, G.11 y G.41 se ubicaron entre los portainjertos con mayor eficiencia productiva acumulada y fueron recomendados por su resistencia a *Erwinia amylovora* (Czynczyk & Bielicki, 2012).

**Portainjertos de vigor intermedio en sistemas intensivos (M.26, G.935)**: Los portainjertos de vigor intermedio, como M.26 y G.935, son compatibles con sistemas de conducción como Bi-Baumm®, Doble Bi-Baumm® y V/Y Trellis, los cuales favorecen una mejor distribución de la radiación dentro del dosel y contribuyen a mejorar la calidad del fruto. Evaluaciones realizadas en Brasil indican que las configuraciones de múltiples ejes incrementan diversos atributos de calidad, mientras que los sistemas de eje simple favorecen una mayor productividad (Rufato et al., 2022). En Golden Delicious, M.26 confiere un mayor vigor que M.9 y produce frutos de tamaño comparable, aunque con una menor eficiencia productiva. Por su parte, G.935 combina un vigor intermedio con resistencia al fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*) y a la enfermedad de replante, lo que amplía su potencial de utilización en sistemas intensivos de producción. En conjunto, la evidencia demuestra que el éxito de los sistemas intensivos de producción depende de la adecuada integración entre el portainjerto, la variedad y el sistema de conducción, más que de la selección aislada de cualquiera de estos componentes. No obstante, la sostenibilidad de estas combinaciones también está condicionada por la resistencia a enfermedades y la adaptación a las condiciones edafoclimáticas, factores que determinan su desempeño y viabilidad a largo plazo.

**Comparativa de resistencia a enfermedades según el tipo de portainjerto**

La resistencia a enfermedades constituye un criterio fundamental en la selección de portainjertos, particularmente en regiones con historial de cultivo continuo de manzano. En Cuauhtémoc, Chihuahua, la enfermedad de replante y la presencia de patógenos radiculares han sido documentadas como factores que limitan el establecimiento, el desarrollo radical y la productividad de los huertos de manzano (Armendariz-Acosta et al., 2010; Ruiz-Cisneros et al., 2017). En este contexto, la resistencia del portainjerto adquiere un papel determinante para mejorar la estabilidad, la productividad y la longevidad del sistema productivo.

Entre las principales enfermedades que afectan a los portainjertos destacan el fuego bacteriano (*E. amylovora*), la pudrición de raíz causada por *Phytophthora* spp. y la enfermedad de replante, las cuales pueden generar pérdidas significativas en condiciones favorables para su desarrollo (Cuadro 1). La evidencia científica indica que la respuesta a estos patógenos varía significativamente entre series de portainjertos, observándose diferencias en los niveles de susceptibilidad, tolerancia y capacidad de recuperación del sistema radical.

En particular, portainjertos de la serie Geneva han mostrado un desempeño favorable bajo condiciones de replante. Peșteanu y Cumpanici (2024) reportaron que G.11 y G.41 presentaron mayor estabilidad en suelos con historial de cultivo continuo, mientras que Rufato et al. (2021) demostraron que materiales como G.202, G.210, G.213 y G.814 mantienen un buen desempeño bajo condiciones severas de replante, destacando G.210 como una alternativa para la reconversión inmediata de huertos y G.213 por su elevada eficiencia productiva una vez superado el periodo inicial de establecimiento. En consecuencia, la elección del portainjerto debe integrar criterios sanitarios junto con el desempeño agronómico, especialmente en huertos establecidos sobre suelos con antecedentes de replante.

**Efecto del portainjerto en la calidad y fisiología del fruto**

El portainjerto influye en la calidad del fruto mediante la regulación de procesos fisiológicos que determinan el crecimiento y desarrollo del árbol. Entre los principales mecanismos se encuentran la absorción y translocación de agua y nutrientes, la partición de fotoasimilados, la síntesis y señalización de fitohormonas, así como la regulación de la conductividad hidráulica y del vigor vegetativo. Estos procesos modifican el equilibrio fuente-demanda (*source-sink*), condicionando la disponibilidad de recursos para el desarrollo del fruto y, en consecuencia, atributos como el tamaño, el peso, la firmeza, la coloración, el contenido de sólidos solubles, la acidez y la susceptibilidad a desórdenes fisiológicos (Prasad et al., 2024; Valverdi & Kalcsits, 2021). Además, estos mecanismos pueden influir en el retorno floral y la alternancia productiva mediante cambios en la señalización hormonal, la asignación de recursos y las respuestas al estrés en la combinación portainjerto-variedad (Carraro et al., 2026).

La expresión de estos atributos depende de la combinación portainjerto-variedad y de las condiciones ambientales (Cuadro 2). Diversos estudios han demostrado que el portainjerto modula las características fisiológicas y fisicoquímicas del fruto, ejerciendo un efecto directo sobre su calidad comercial y comportamiento poscosecha (Prasad et al., 2024; Valverdi & Kalcsits, 2021).

En ambientes con disponibilidad hídrica variable y condiciones térmicas contrastantes, la eficiencia en la distribución de fotoasimilados y la regulación del estado hídrico del árbol adquieren un papel determinante en la calidad final del fruto, particularmente en sistemas intensivos, donde el portainjerto define la capacidad de respuesta fisiológica del cultivo.

**Criterios prácticos para la selección de portainjertos en campo**

La selección del portainjerto en sistemas de producción de manzano debe abordarse desde un enfoque integral que considere la interacción entre las condiciones edafoclimáticas, el sistema de manejo, la variedad injertada y los objetivos productivos. En regiones semiáridas con limitaciones físicas y químicas del suelo, alta variabilidad climática y presencia de enfermedad de replante, esta decisión constituye un factor determinante para el desempeño técnico y la sostenibilidad del huerto.

Bajo este contexto, y a partir de la evidencia científica disponible contrastada con condiciones reales de producción, se sintetizan criterios prácticos para la

selección de portainjertos adaptados a sistemas intensivos bajo condiciones restrictivas (Cuadro 3).

**Implicaciones para la selección de portainjertos en Cuauhtémoc, Chihuahua**

**Contexto ecológico**. La región de Cuauhtémoc, Chihuahua, México, presenta un clima semiseco templado, con alta variación térmica, riesgo de heladas tardías y altitudes cercanas a 2,000 msnm (Ramírez-Legarreta et al., 2008, 2011). La precipitación regional es insuficiente para cubrir los requerimientos hídricos del manzano, por lo que su producción depende del riego y enfrenta restricciones asociadas con la disponibilidad de agua (Rascón-Castillo et al., 2024; Villagrán-Deoses et al., 2015). Estas condiciones deben considerarse al seleccionar combinaciones portainjerto-variedad para los sistemas productivos regionales.

**Dinámica del sistema productivo**. La sostenibilidad del sistema manzanero depende de la interacción entre el estrés hídrico, las limitaciones nutricionales y la presión fitosanitaria. El déficit hídrico reduce la conductividad hidráulica y la eficiencia en el uso del agua, con efectos directos sobre el rendimiento y la estabilidad fisiológica del árbol (Yang et al., 2022). Asimismo, los suelos con historial de replante y la persistencia de patógenos incrementan la complejidad fitosanitaria del sistema. Por otra parte, la variabilidad climática, particularmente en la acumulación de horas frío y la ocurrencia de heladas tardías, genera fluctuaciones interanuales en la productividad del manzano (Duan et al., 2023), condicionando el desempeño de los portainjertos en sistemas intensivos de producción. En la región manzanera de Cuauhtémoc, Chihuahua, la acumulación invernal de frío presenta una importante variación entre ciclos agrícolas como consecuencia de las condiciones climáticas de cada temporada. Esta condición ha sido documentada por Cruz-Álvarez et al. (2025), quienes reportaron acumulaciones de 974 a 1,415 unidades de frío en huertos de manzano durante los ciclos 2017-2020, evidenciando la elevada variabilidad interanual de las condiciones invernales en la región.

**Rol del portainjerto en la estabilidad del sistema productivo del manzano**. El portainjerto desempeña un papel fundamental en la estabilidad del sistema productivo de manzano, al modular la interacción árbol-ambiente mediante la regulación del vigor, la eficiencia en el uso de los recursos y la tolerancia a factores de estrés. Entre los procesos fisiológicos involucrados destacan las relaciones hídricas hoja-raíz, las cuales determinan la conductividad hidráulica, el estado hídrico del árbol y su capacidad de adaptación a condiciones ambientales restrictivas (Casagrande Biasuz & Kalcsits, 2022). Estos mecanismos adquieren especial relevancia en regiones semiáridas como Cuauhtémoc, Chihuahua, donde la disponibilidad de agua constituye uno de los principales factores que condicionan el desempeño del sistema productivo.

Bajo este enfoque, la eficiencia en el uso del agua y la regulación fisiológica son determinantes para la estabilidad del sistema. Materiales como G.11 y G.969 pueden alcanzar alta productividad bajo condiciones similares; sin embargo, su desempeño depende del manejo y del sitio (Cruz-Álvarez et al., 2025). En sistemas intensivos, la estabilidad responde a la interacción entre portainjerto y manejo, especialmente bajo riego tecnificado y alta densidad (Reig et al., 2020; Romero Domínguez et al., 2017).

**Resiliencia sanitaria y limitaciones del suelo**. La enfermedad de replante y la presencia de patógenos del suelo representan limitantes estructurales en los sistemas intensivos de producción de manzano, particularmente en huertos establecidos sobre sitios previamente cultivados. En este contexto, los portainjertos de la serie Malling han mostrado una susceptibilidad consistente bajo condiciones de replante, afectando negativamente el establecimiento y el crecimiento inicial del huerto (Auvil et al., 2011; Robinson et al., 2012).

Desde un enfoque fisiológico, una menor masa radicular limita la absorción de agua y nutrientes, generando condiciones de restricción que alteran la asignación y el metabolismo del carbono. En estas condiciones, la planta modifica procesos relacionados con la partición de fotoasimilados, el transporte y la utilización de carbohidratos y la asignación de carbono hacia el sistema radical para favorecer la adquisición de recursos. Además, una menor disponibilidad de carbohidratos en la raíz reduce su actividad fisiológica, la absorción de nitrógeno y la exudación radical, afectando el equilibrio metabólico de la planta (Chen et al.,

2025). Estos cambios interactúan con la regulación de los mecanismos de defensa, lo que puede traducirse en distintos niveles de susceptibilidad al tizón de fuego, causado por *E. amylovora* (Singh et al., 2019). En consecuencia, este comportamiento restringe el uso de estos portainjertos en sistemas de reconversión o en suelos con antecedentes fitosanitarios adversos.

En contraste, los portainjertos de la serie Geneva han mostrado una mayor tolerancia al estrés biótico del suelo y un mejor desempeño en condiciones de baja o nula fumigación, lo que favorece la estabilidad del sistema productivo. Asimismo, su resistencia parcial a patógenos como *Phytophthora* spp. y *E. amylovora* ha sido incorporada como un componente clave en estrategias de manejo integrado (Fazio et al., 2015; Peșteanu & Cumpanici, 2024).

### Evidencia regional y aportaciones de investigación en Cuauhtémoc, Chihuahua

Si bien la presente revisión se centra en las series Malling, Budagovsky y Geneva por su relevancia en la producción comercial de manzano y su amplia adopción internacional, los primeros estudios desarrollados en Chihuahua incluyeron la evaluación de otros portainjertos introducidos de programas internacionales de mejoramiento, como EMLA.7 y EMLA.26 (Inglaterra), P.22 (Polonia) y MAC.1 y MAC.39 (Canadá). Estos materiales aportaron información fundamental sobre vigor, nutrición mineral y adaptación bajo las condiciones edafoclimáticas de la región, constituyendo la base para la evaluación posterior de portainjertos de nueva generación.

La validación experimental en condiciones locales constituye un elemento clave para la adopción efectiva de portainjertos. Los trabajos desarrollados en la región (Cuadro 4) evidencian una evolución en los objetivos de investigación, pasando de estudios orientados a la eficiencia productiva durante las décadas de 1980-1990 a la caracterización fisiológica y nutricional en 1990-2000, y posteriormente a investigaciones integrales sobre resiliencia al estrés hídrico, sanidad del suelo y adaptación al cambio climático durante el periodo 2010-2025. Esta evolución refleja un cambio en las prioridades de investigación y en las necesidades del sector productivo, orientándose hacia sistemas intensivos adaptados a condiciones semiáridas, donde la selección del portainjerto constituye un factor determinante para la productividad y la sostenibilidad de la producción de manzano.

## Conclusiones

El desempeño de los portainjertos de manzano está determinado por la interacción entre ambiente, manejo y combinación variedad-portainjerto. La serie Malling, aunque de relevancia histórica, presenta limitaciones en resistencia a enfermedades y adaptación a condiciones de replante. La serie Budagovsky ofrece un control eficiente del vigor, pero con alta dependencia del manejo agronómico. En contraste, la serie Geneva muestra el mejor balance entre productividad, estabilidad fisiológica y resistencia fitosanitaria bajo condiciones restrictivas, posicionándose como una alternativa robusta para sistemas semiáridos. En consecuencia, la selección del portainjerto debe basarse en un enfoque específico del sitio que integre condiciones edafoclimáticas, nivel tecnológico y objetivos productivos, como criterio clave para optimizar la eficiencia y sostenibilidad del sistema.

## Revisión de literatura

Armendariz-Acosta, M. F., Núñez-Barrios, A., Parra-Quezada, R. Á., & Jacobo-Cuellar, J. L. (2010). Evaluación de portainjertos y metam sodium aplicado al suelo para resolver problemas de replante en manzano. *Tecnociencia Chihuahua*, *4*(3), 126-131. https://doi.org/10.54167/tch.v4i3.708

Auvil, T. D., Schmidt, T. R., Hanrahan, I., Castillo, F., McFerson, J. R., & Fazio, G. (2011). Evaluation of dwarfing rootstocks in Washington apple replant sites. *Acta Horticulturae, 903*, 265-271. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.33

Autio, W., Robinson, T., Black, B., Crassweller, R., Fallahi, E., Hoying, S., Parker, M., Parra Quezada, R., Reig, G., & Wolfe, D. (2020). Budagovsky, Geneva, Pillnitz, and Malling apple rootstocks affect "Fuji" performance over eight years in the 2010 NC-140 "Fuji" apple rootstock trial. *Journal of the American Pomological Society*, *74*(4), 196-209. https://doi.org/10.71318/apom.2020.74.4.196

Carraro, P., Naeem, M. Y., Girardi, F., Botton, A., Varotto, S., Ruperti, B., & Bonghi, C. (2026). A rootstock-centered

perspective on the regulation of alternate bearing in fruit trees. *Journal of Experimental Botany*, *77*(2), 267-281. https://doi.org/10.1093/jxb/eraf460

Casagrande Biasuz, E., & Kalcsits, L. A. (2022). Apple rootstocks affect functional leaf traits with consequential effects on carbon isotope composition and vegetative vigour. *AoB PLANTS*, *14*(4), plac020. https://doi.org/10.1093/aobpla/plac020

Chen, J., Cao, J., Guo, B., Han, M., Feng, Z., Tang, J., Mo, X., Wang, J., Yang, Q., Pei, Y., Kuzyakov, Y., Ding, J., Makita, N., Yang, X., Zhang, H., Zhao, Y., & Kong, D. (2025). Increased dependence on mycorrhizal fungi for nutrient acquisition under carbon limitation by tree girdling. *Plant Diversity*, *47*(3), 466-478. https://doi.org/10.1016/j.pld.2025.02.004

Choi, B.-H., Bhusal, N., Jeong, W.-T., Park, I.-H., Han, S.-G., & Yoon, T.-M. (2020). Drought tolerance of "Fuji" apple trees grafted onto G, CG, or M series rootstocks: Growth and physiology. *Horticultural Science and Technology*, *38*(5), 583-594. https://doi.org/10.7235/HORT.20200054

Choi, B.-H., Kim, C.-S., Jeong, Y.-J., Park, I.-H., Han, S.-G., & Yoon, T.-M. (2021). Resistance evaluation of G, CG, or M series apple rootstocks to soil-borne diseases (*Phytophthora* root rot, white root rot, and southern blight) and woolly apple aphid. *Horticultural Science and Technology*, *39*(2), 167-174. https://doi.org/10.7235/HORT.20210015

Cline, J. A., Autio, W., Clements, J., Cowgill, W., Crassweller, R., Einhorn, T., Fallahi, E., Francescatto, P., Hoover, E., Lang, G., Lordan, J., Moran, R., Muehlbauer, M., Musacchi, S., Stasiak, M., Parra Quezada, R., Robinson, T., Serra, S., Sherif, S., … Zandstra, J. (2021). Early performance of "Honeycrisp" apple trees on several size-controlling rootstocks in the 2014 NC-140 rootstock trial. *Journal of the American Pomological Society*, *75*(4), 189-202. https://doi.org/10.71318/apom.2021.75.4.189

Cline, J. A., Autio, W., Clements, J., Cowgill, W., Crassweller, R., Einhorn, T., Francescatto, P., Gonzalez Nieto, L., Hoover, E., Lang, G., Lordan, J., Moran, R., Muehlbauer, M., Musacchi, S., Schupp, J., Stasiak, M., Parra Quezada, R., Robinson, T., Serra, S., … Zandstra, J. (2025). Performance of "Honeycrisp" apple trees on several size-controlling rootstocks in the 2014 NC-140 rootstock trial after ten years. *Journal of the American Pomological Society*, *79*(3), 82-110. https://doi.org/10.71318/zfq46c93

Colpo, A., Demaria, S., Zaccarini, M., Forlani, A., Senatore, A., Marrocchino, E., Martina, A., & Ferroni, L. (2024). Drought-stressed apple tree grafted onto different rootstocks in a coastal sandy soil: Link between fast chlorophyll a fluorescence and production yield. *Agronomy*, *14*(6), 1304. https://doi.org/10.3390/agronomy14061304

Cruz-Alvarez, O., Ornelas-Paz, J. de J., Araujo-Pallares, D. L., Frias-Moreno, M. N., Ávila-Quezada, G. D., Ojeda-Barrios, D. L., & Jacobo-Cuellar, J. L. (2025). Temporal variations in flowering of "Honeycrisp" apple grafted on eight different rootstocks. *Horticultural Science*, *52*(3), 211-223. https://doi.org/10.17221/32/2024-HORTSCI

Czynczyk, A., & Bielicki, P. (2012). Eleven year evaluation of American (Geneva®) and Polish rootstocks with "Golden Delicious Reinders" apple in Poland. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, *20*(2), 11-21. https://doi.org/10.2478/v10290-012-0011-y

Dallabetta, N., Giordan, M., Guerra, A., & Pasqualini, J. (2018). The performance of Geneva apple rootstocks in the province of Trento. *Acta Horticulturae*, *1228*, 153-160. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1228.23

Dayatilake, G. A., Breen, K., Bus, V., & Hedderley, D. (2025). Rootstock effect on growth, branch morphology and flowering precocity of young monoaxis and biaxis trees of "Scilate" and "Fuji supreme" apple cultivars. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, *53*(5), 1463-1475. https://doi.org/10.1080/01140671.2024.2362206

Denardi, F., Kvitschal, M. V., & Hawerroth, M. C. (2018). Yield performance of apple rootstocks of the Geneva series on replanting soil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *53*(8), 924-933. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000800007

Duan, Z., Ding, J., Jiang, Y., & Zhang, W. (2023). Integrated soil-fruit-climate management system to improve apple production stability. *Science of The Total Environment*, *905*, 167840. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167840

Fallahi, E., Kiester, M. J., Fallahi, B., & Mahdavi, S. (2018). Rootstock, canopy architecture, bark girdling, and scoring influence on growth, productivity, and fruit quality at harvest in "Aztec Fuji" apple. *HortScience*, *53*(11), 1629-1633. https://doi.org/10.21273/HORTSCI13348-18

Fazio, G. (2017). Evaluating and improving rootstocks for apple cultivation. En K. Evans (Ed.), *Achieving sustainable cultivation of apples* (pp. 135-164 ). Burleigh Dodds Science Publishing. https://doi.org/10.19103/AS.2016.0017.08

Fazio, G. (2021). Genetics, breeding, and genomics of apple rootstocks. En S. S. Korban (Ed.), *The apple genome* (pp. 105-130). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74682-7_6

Fazio, G., Robinson, T. L., & Aldwinckle, H. S. (2015). The Geneva apple rootstock breeding program. En J. Janick (Ed.), *Plant breeding reviews* (Vol. 39, pp. 379-424). Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781119107743.ch08

Gjamovski, V., & Kiprijanovski, M. (2011). Influence of nine dwarfing apple rootstocks on vigour and productivity of apple cultivar "Granny Smith". *Scientia Horticulturae*, *129*(4), 742-746. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.05.032

Gonzalez Nieto, L., Reig, G., Lordan, J., Miranda Sazo, M., Hoying, S. A., Fargione, M. J., Reginato, G. H., Donahue, D. J., Francescatto, P., Casagrande Biasuz, E., Fazio, G., & Robinson, T. L. (2023). Long-term effects of rootstock and tree type on the economic profitability of "Gala", "Fuji" and "Honeycrisp" orchards performance. *Scientia Horticulturae*, *318*, 112129. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112129

Hampson, C. R., Quamme, H. A., & Brownlee, R. T. (2002). Canopy growth, yield, and fruit quality of "Royal Gala" apple trees grown for eight years in five tree training systems. *HortScience*, *37*(4), 627-631. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.37.4.627

Hassanzai, R. G., & Ayobi, M. N. (2025). A review of planting systems in apple orchards: Principles, practices, and performance. *Elm-Ow-Fon Scientific Research Journal*, *63*(2), 19-29.

Ho, S.-T., Gonzalez Nieto, L., Rickard, B. J., Reig, G., Lordan, J., Lawrence, B. T., Fazio, G., Hoying, S. A., Fargione, M. J., Miranda Sazo, M., & Robinson, T. L. (2024). Effects of cultivar, planting density and rootstock on long-term economic performance of apple orchards in the Northeastern US. *Scientia Horticulturae*, *332*, 113194. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113194

Kairova, G., Pozharskiy, A., Daulet, N., Solomadin, M., Sandybayev, N., Khusnitdinova, M., Nizamdinova, G., Sapakhova, Z., & Gritsenko, D. (2023). Evaluation of fire blight resistance of eleven apple rootstocks grown in Kazakhstani fields. *Applied Sciences*, *13*(20), 11530. https://doi.org/10.3390/app132011530

Ladikou, E.-V., Daras, G., Landi, M., Chatzistathis, T., Sotiropoulos, T., Rigas, S., & Papadakis, I. E. (2025). Physiological and biochemical effects of potassium deficiency on apple tree growth. *Horticulturae*, *11*(1), 42. https://doi.org/10.3390/horticulturae11010042

Ladon, T., Chandel, J. S., Sharma, N. C., Verma, P., Singh, G., & Bhickta, G. (2022). Influence of planting density, canopy architecture and drip fertigation on plant growth and productivity of apple (*Malus × domestica* Borkh.). *Indian Journal of Ecology*, *49*(4), 1292-1298. https://doi.org/10.55362/IJE/2022/3660

Laužikė, K., Uselis, N., & Samuolienė, G. (2021). The influence of rootstock and high-density planting on apple cv. Auksis fruit quality. *Plants*, *10*(6), 1253. https://doi.org/10.3390/plants10061253

Lawrence, B. T., Fazio, G., Gonzalez Nieto, L., & Robinson, T. L. (2025). Rootstock effect on horticultural performance and fruit quality is not uniform across five commercial apple cultivars in western New York. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1552625. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1552625

Mares-Ponce de León, Y., Muñoz-Castellanos, L. N., Ruiz-Cisneros, M. F., Pérez-Corral, D. A., Ornelas-Paz, J. J., Acosta-Muñiz, C. H., Berlanga-Reyes, D. I., & Rios-Velasco, C. (2018). Morphological and molecular identification of *Mortierella* species associated to rhizosphere of apple trees with symptoms of root diseases. *Revista Mexicana de Fitopatología*, *36*(1), 184-195. https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1710-2

Marini, R. P., & Fazio, G. (2018). Apple rootstocks: History, physiology, management, and breeding. En I. Warrington (Ed.), *Horticultural reviews* (Vol. 45, pp. 197-312). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119431077.ch6

McKenzie, D. W. (1985). Apple rootstock trials: Golden Delicious on eight semi-dwarfing rootstocks in Hawke's Bay, New Zealand. *Journal of Horticultural Science, 60*(1), 7-11. https://doi.org/10.1080/14620316.1985.11515593

Miah, M. S., Hinson, C., & Farcuh, M. (2023). Assessing fruit maturity and quality of "Buckeye Gala" grown on a diverse panel of apple (*Malus domestica* Borkh.) rootstocks in western Maryland. *Agronomy*, *13*(10), 2528. https://doi.org/10.3390/agronomy13102528

Nava, G., Ciotta, M. N., Pasa, M. da S., & Boneti, J. I. da S. (2018). Mineral composition of leaves and fruits of apple "Fuji" on different rootstocks in the region of São Joaquim-SC. *Revista Brasileira de Fruticultura*, *40*(2), e-685. https://doi.org/10.1590/0100-29452018685

Norelli, J. L., Aldwinckle, H. S., Holleran, H. T., Robinson, T. L., & Johnson, W. C. (2002). Resistance of "Geneva" ap-

ple rootstocks to *Erwinia amylovora* when grown as potted plants and orchard trees. *Acta Horticulturae*, *590*, 359-362. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.590.53

Parra Quezada, R. A., & Becerril Román, A. E. (1999). Efecto de portainjertos de manzano en la concentración nutrimental de la hoja en el cv. Starkspur Supreme Delicious. *Terra Latinoamericana*, *17*(1), 1-7.

Parra Quezada, R. A., Becerril Román, A. E., Martínez Hernández, J. J., & Acosta Hernández, R. (2001). Distribución de materia seca, N, P y K en manzano Golden Delicious afectado por humedad, fertilización y portainjertos. *Terra Latinoamericana*, *19*(3), 273-279.

Parra Quezada, R. A., Guerrero Prieto, V. M., & Siller Cepeda, J. H. (1990). Producción, dimensiones del árbol y eficiencia de portainjertos para manzano. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *13*(2), 188-203. https://doi.org/10.35196/rfm.1990.2.118

Peña-Antillón, I. M., Jacobo-Cuéllar, J. L., Parra-Quezada, R. A., Guerrero-Prieto, V. M., Ramírez-Legarreta, M. R., Ojeda-Barrios, D. L., Hernández-Rodríguez, O. A., & Salas-Salazar, N. A. (2019). Influencia del frío invernal y portainjertos en la brotación y floración del manzano Royal Gala. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *42*(4), 405-410.

Peșteanu, A., & Cumpanici, A. (2024). Behavior of apple trees on Geneva series rootstocks on land replanted after the orchard. *Annals of the University of Craiova*, *29*(65), 376-381. https://doi.org/10.52846/bihpt.v29i65.166

Prasad, K., Singh, S. K., Kumar, S., Maurya, P., Saroj, N., Maurya, S., Agnihotri, R., Lal, M. K., & Ahanger, M. A. (2024). Rootstock mediates postharvest fruit quality, phytochemicals, and plant stress of fruit crops. En M. A. Ahanger, J. A. Bhat, P. Ahmad, & R. John (Eds.), *Improving stress resilience in plants* (pp. 425-446). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18927-2.00004-2

Ramírez-Legarreta, M. R., Jacobo-Cuéllar, J. L., Gardea-Béjar, A. A., & Parra-Quezada, R. Á. (2008). Modelo de desarrollo floral en manzanos [*Malus sylvestris* (L.) Mill. var. *domestica* (Borkh) Mansf.] Red Delicious y Golden Delicious como herramienta de toma de decisiones en el manejo integrado de enfermedades. *Revista Mexicana de Fitopatología*, *26*(2), 153-163.

Ramírez-Legarreta, M. R., Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G., Jacobo-Cuéllar, J. L., Parra-Quezada, R. Á., Ávila-Marioni, M. R., & Amado-Álvarez, J. P. (2011). Perspectivas del sistema de producción de manzano en Chihuahua ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *2*(núm. esp. 2), 265-279.

Rascón-Castillo, M., Lozano-Martínez, C. A., Jacobo-Cuellar, J. L., Frias-Moreno, M. N., Cruz-Álvarez, O., Hernández-Rodríguez, O. A., Ojeda-Barrios, D. L., & Parra-Quezada, R. Á. (2024). Portainjertos de manzano [*Malus sylvestris* (L.) Mill. var *domestica* (Borkh) Mansf.] sometidos a estrés hídrico. *Terra Latinoamericana*, *42*, e1773. https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1773

Reig, G., Lordan, J., Hoying, S., Fargione, M., Donahue, D. J., Francescatto, P., Acimovic, D., Fazio, G., & Robinson, T. (2020). Long-term performance of "Delicious" apple trees grafted on Geneva® rootstocks and trained to four high-density systems under New York State climatic conditions. *HortScience*, *55*(10), 1538-1550. https://doi.org/10.21273/HORTSCI14904-20

Robinson, T. L. (2011). Advances in apple culture worldwide. *Revista Brasileira de Fruticultura, 33*(spe1), 37-47. https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500006

Robinson, T., Autio, W., Clements, J., Cowgill, W., Embree, C., Gonzalez, V., Hoying, S., Kushad, M., Parker, M., Parra, R., & Schupp, J. (2012). Rootstock tolerance to apple replant disease for improved sustainability of apple production. *Acta Horticulturae*, *940*, 521-528. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.940.75

Romero Domínguez, L., Parra Quezada, R. Á., Jacobo Cuellar, J. L., Ojeda Barrios, D. L., Guerrero Prieto, V. M., Ávila Quezada, G. D., & Ruiz Anchondo, T. de J. (2017). Respuesta de portainjertos de manzano a vigor, eficiencia de producción y concentraciones foliar y en fruto de NPK. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *8*(4), 849-861. https://doi.org/10.29312/remexca.v8i4.12

Rufato, L., da Silva, P. S., Kretzschmar, A. A., Bogo, A., de Macedo, T. A., Welter, J. F., Fazio, G., & Petry, D. (2021). Geneva® series rootstocks for apple trees under extreme replanting conditions in Southern Brazil. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 712162. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.712162

Rufato, L., Woitexen, J. F. W., Luz, A. R., da Silva, P. S., de Macedo, T. A., Pereira, M. F. G., Ferreira, A. S., & Kretzschmar, A. A. (2022). Horticultural performance of "Fuji Suprema" and "Maxi Gala" apple trees trained at Tall Spindle and Bi-Axis systems grafted on different rootstocks in Southern Brazil. *Ciência Rural*, *52*(10), e20210419. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210419

Ruiz-Cisneros, M. F., Ríos-Velasco, C., Berlanga-Reyes, D. I., Ornelas-Paz, J. de J., Acosta-Muñiz, C. H., Romo-Chacón, A., Zamudio-Flores, P. B., Pérez-Corral, D. A., Salas-Marina, M. Á., Ibarra-Rendón, J. E., &

Fernández-Pavía, S. P. (2017). Incidence and causal agents of root diseases and its antagonists in apple orchards of Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, *35*(3), 437-462. https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1704-3

Singh, J., Fabrizio, J., Desnoues, E., Silva, J. P., Busch, W., & Khan, A. (2019). Root system traits impact early fire blight susceptibility in apple (*Malus* × *domestica*). *BMC Plant Biology*, *19*, 579. https://doi.org/10.1186/s12870-019-2202-3

Song, X., Gao, X., Wu, P., Zhao, X., Zhang, W., Zou, Y., & Siddique, K. H. M. (2020). Drought responses of profile plant-available water and fine-root distributions in apple (*Malus pumila* Mill.) orchards in a loessial, semi-arid, hilly area of China. *Science of the Total Environment*, *723*, 137739. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137739

Stănică, F. (2019). New tendencies in fruit trees training and orchard planting systems. *Scientific Papers. Series B. Horticulture*, *63*(2), 25-34.

Valverdi, N. A., & Kalcsits, L. (2021). Rootstock affects scion nutrition and fruit quality during establishment and early production of "Honeycrisp" apple. *HortScience*, *56*(2), 261-269. https://doi.org/10.21273/HORTSCI15488-20

Villagrán-Deoses, R. A., Núñez-Barrios, A., Parra-Quezada, R. Á., Jacobo-Cuellar, J. L., Ojeda-Barrios, D. L., Ruíz-Anchondo, T. de J., & Salas-Salazar, N. (2015). Riego parcial de la raíz en manzano Golden Delicious. *Terra Latinoamericana, 33*(4), 299-308. https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/68

Xu, H., & Ediger, D. (2021). Rootstocks with different vigor influenced scion-water relations and stress responses in Ambrosia™ apple trees (*Malus domestica* var. *Ambrosia*). *Plants*, *10*(4), 614. https://doi.org/10.3390/plants10040614

Yang, W., Ma, X., Ma, D., Shi, J., Hussain, S., Han, M., Costes, E., & Zhang, D. (2021). Modeling canopy photosynthesis and light interception partitioning among shoots in bi-axis and single-axis apple trees (*Malus domestica* Borkh.). *Trees*, *35*(3), 845-861. https://doi.org/10.1007/s00468-021-02085-z

Yang, M., Gao, X., Wang, S., & Zhao, X. (2022). Quantifying the importance of deep root water uptake for apple trees' hydrological and physiological performance in drylands. *Journal of Hydrology*, *606*, 127471. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127471

Yuri, J. A., Moggia, C., Sepulveda, A., Poblete-Echeverría, C., Valdés-Gómez, H., & Torres, C. A. (2019). Effect of cultivar, rootstock, and growing conditions on fruit maturity and postharvest quality as part of a six-year apple trial in Chile. *Scientia Horticulturae*, *253*, 70-79. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.020

Zhang, D., He, J., Cheng, P., Zhang, Y., Khan, A., Wang, S., Li, Z., Zhao, S., Zhan, X., Ma, F., Li, X., & Guan, Q. (2023). 4-methylumbelliferone (4-MU) enhances drought tolerance of apple by regulating rhizosphere microbial diversity and root architecture. *Horticulture Research*, *10*(7), uhad099. https://doi.org/10.1093/hr/uhad099

**Cuadro 1. Comparativa de la resistencia a enfermedades de distintos portainjertos.**

| Serie / Portainjerto | Fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*) | *Phytophthora* spp. (pudrición de raíz) | Enfermedad de replante (ARD) | Implicación agronómica |
|---|---|---|---|---|
| Malling (M.9, M.26, M.7) | Alta susceptibilidad; progresión sistémica desde el injerto; alta mortalidad en condiciones favorables (Marini & Fazio, 2018; Norelli et al., 2002; Robinson, 2011). | Alta susceptibilidad; elevada mortalidad en suelos infestados (Robinson, 2011). Mortalidad registrada: 80 % en M.9 y 53 % en M.26 (Choi et al., 2021). | Alta susceptibilidad; reducción del crecimiento 30-50 % sin fumigación (Auvil et al., 2011; Robinson, 2011). | Alto riesgo sanitario; requiere manejo intensivo (químico y cultural); limitado en replante. |
| Budagovsky (B.9) | Tolerancia intermedia; menor daño que M.9, pero inferior a Geneva (Robinson, 2011). | Evidencia limitada; posible tolerancia parcial (Auvil et al., 2011). | Tolerancia intermedia; menor reducción de crecimiento en replante; respuesta moderada a fumigación (Robinson et al., 2012). | Opción para sistemas de muy alta densidad; riesgo sanitario moderado. |
| Geneva (G.11, G.41, G.935, G.202, G.969) | Alta resistencia genética; menor progresión de infección y mayor compartimentalización (Fazio et al., 2015; Kairova et al., 2023). | Alta tolerancia; menor incidencia y mayor supervivencia en campo (Cline et al., 2021; Robinson, 2011). | Alta tolerancia; crecimiento y rendimiento estables en suelos replantados (Peşteanu & Cumpanici, 2024; Auvil et al., 2011; Robinson et al., 2012). | Menor dependencia de agroquímicos; mayor estabilidad productiva; opción estratégica en replante y alta presión de enfermedades. |

Nota: El cuadro sintetiza evidencia agronómica, fitosanitaria y fisiológica sobre la resistencia de distintas series de portainjertos de manzano frente a enfermedades clave, integrando resultados de ensayos multirregionales (NC-140 y literatura asociada).

**Cuadro 2. Efecto del portainjerto sobre la calidad y fisiología del fruto en manzano.**

| Atributo de calidad | Serie / Portainjerto | Efecto observado | Implicación agronómica | Referencias (orden cronológico) |
|---|---|---|---|---|
| Tamaño y peso del fruto | M.9, M.26 (Malling) | Tamaño adecuado, pero generalmente inferior a Geneva | Mayor dependencia de manejo (raleo, nutrición) | Robinson et al. (2012), Reig et al. (2020) |
| | G.935 (Geneva) | Tamaño similar o ligeramente superior a M.9/M.26 | Mayor valor por otros atributos (eficiencia, nutrición) | Robinson et al. (2012), Fazio et al. (2015) |
| | B.9 (Budagovsky) | Tendencia a menor tamaño por bajo vigor | Requiere ajuste fino de carga frutal | Robinson et al. (2012), Xu & Ediger (2021) |
| | G.11, G.41 (Geneva) | Mayor tamaño y mejor distribución de calibres frente a M.9 y M.26; incrementos de 10 % a 15 % en peso | Mayor proporción de fruta comercial (> 70 mm); ventaja en mercados prémium | Reig et al. (2020), Valverdi & Kalcsits (2021), Miah et al. (2023), Cline et al. (2025) |
| | G.41 (Geneva) | Mayor número de frutos por árbol + mayor tamaño | Incremento directo en rendimiento comercializable | Valverdi & Kalcsits (2021), Miah et al. (2023), Cline et al. (2025) |

**Cuadro 2. Efecto del portainjerto... (continuación).**

| Atributo de calidad | Serie / Portainjerto | Efecto observado | Implicación agronómica | Referencias (orden cronológico) |
|---|---|---|---|---|
| Tamaño y peso del fruto | G.890 (Geneva) | Frutos de mayor tamaño asociados a mayor vigor | Aumento de calibre, pero riesgo de desbalance vegetativo | Valverdi & Kalcsits (2021) |
| | MM.106 (Malling) | Menor número de frutos, pero mayor peso individual | Estrategia: menor carga con mayor calibre | Colpo et al. (2024) |
| | General (vigor alto) | Mayor tamaño y firmeza; retraso en maduración | Ajuste de cosecha y manejo según mercado | Miah et al. (2023) |
| Coloración | G.11, G.41 (Geneva) | Mejora moderada frente a Malling | Ventaja adicional dependiente de ambiente | Dallabetta et al. (2018), Reig et al. (2020) |
| | G.935 (Geneva) | Incremento de 15-25 % en color rojo; mayor uniformidad | Mejora valor comercial en variedades rojas/bicolores | Fazio et al. (2015), Reig et al. (2020) |
| | G.16 (Geneva) | Mejor color en algunos cultivares (“Fuji”) | Potencial mejora estética | Dallabetta et al. (2018) |
| | M.9, M.26 (Malling) | Menor intensidad y uniformidad | Puede limitar calidad visual | Reig et al. (2020) |
| Atributos organolépticos [firmeza, sólidos solubles totales (SST), acidez] | M.9, MM.106 | “Brookfield® Gala” y “Galaxy” en sitios cálidos → mayor etileno | Favoreció desarrollo de color rojo y mayor firmeza | Yuri et al. (2019) |
| | G.41 (Geneva) | Ligera mejora en firmeza | Ventaja en vida poscosecha | Valverdi & Kalcsits (2021) |
| | G.890 (Geneva) | Frutos más grandes, pero mayor incidencia de *bitter pit* | Riesgo de desórdenes fisiológicos | Valverdi & Kalcsits (2021) |
| | G.213 (Geneva) | Mayor SST y precocidad | Cosecha anticipada y mejor calidad gustativa | Rufato et al. (2021) |
| | General (vigor) | Vigorosos → mayor firmeza y azúcares; enanizantes → mayor acidez y antioxidantes | Selección según mercado objetivo | Fallahi et al. (2018), Miah et al. (2023) |
| | General (todas las series) | Efecto limitado y variable | Mayor influencia del ambiente y cultivar | Reig et al. (2020), Miah et al. (2023) |
| Desórdenes fisiológicos (*bitter pit*) | G.935 (Geneva) | Reducción significativa (30 % a 50 %) | Mejora calidad exportable | Robinson et al. (2012), Fazio et al. (2015) |
| | G.41, G.890 (Geneva) | Mayor incidencia asociada a alto K | Requiere manejo nutricional | Valverdi & Kalcsits (2021) |
| | G.11, G.41 (Geneva) | Tendencia variable | Beneficio inconsistente | Robinson et al. (2012) |
| | M.26 (Malling) | Alta susceptibilidad | Manejo intensivo de Ca | Robinson et al. (2012) |

**Cuadro 2. Efecto del portainjerto... (continuación).**

| Atributo de calidad | Serie / Portainjerto | Efecto observado | Implicación agronómica | Referencias (orden cronológico) |
|---|---|---|---|---|
| Composición mineral | M.26 (Malling) | Mayor absorción de Mg | Posibles desequilibrios | Nava et al. (2018) |
| | Geneva (general) | Alta variabilidad en absorción | Estrategias de fertilización específicas | Fazio et al. (2015), Nava et al. (2018) |
| | G.41 | Mayor absorción de K y N | Riesgo de *bitter pit* | Fazio et al. (2015) |
| | G.214 | Menor absorción de K y N | Alternativa para reducir desórdenes | Fazio et al. (2015) |
| | G.935 | Alta absorción de B | Riesgo de fitotoxicidad | Fazio et al. (2015) |
| | G.210 | Mayor absorción de N | Ajustar fertilización | Fazio et al. (2015) |
| | G.202, G.213 | Buen desempeño en suelos fértiles | Sistemas intensivos | Denardi et al. (2018), Rufato et al. (2021) |
| | General | Interacción portainjerto-riego afectó distribución de Ca y N | Modificó fisiología del fruto | Valverdi & Kalcsits (2021) |
| | General | Relación (K+Mg)/Ca más relevante que Ca | Indicador clave de calidad | Nava et al. (2018) |
| Interacción portainjerto-variedad | General | Influye en maduración y fitoquímica (color, firmeza, vida de anaquel) | Selección específica por cultivar | Fazio (2017, 2021), Laužikė et al. (2021), Prasad et al. (2024) |
| | General | Portainjertos permiten huertos más productivos y uniformes | Selección específica por cultivar | Fazio (2017) |
| | General | Avances genéticos y genómicos permiten personalizar portainjertos | Optimización de rendimiento y calidad | Fazio (2021) |
| | General | Interacción portainjerto-variedad y densidad influyó en fitoquímica | Elección influye directamente en calidad | Laužikė et al. (2021) |
| | General | Efecto dependiente de combinación, ambiente y manejo | No hay portainjerto universalmente superior | Fallahi et al. (2018), Miah et al. (2023) |

Nota: La matriz organiza cronológicamente la evidencia científica sobre el efecto de distintos portainjertos en atributos de calidad y fisiología del fruto de manzano, incluyendo tamaño, coloración, firmeza, atributos organolépticos, desórdenes fisiológicos y composición mineral. La información proviene de ensayos multirregionales (NC-140 y literatura asociada) y estudios indexados recientes.

**Cuadro 3. Matriz de decisión para selección de portainjertos de manzano.**

| Condición dominante | Estrategia productiva | Portainjertos clave | Evidencia científica de soporte (orden cronológico) |
|---|---|---|---|
| Alta densidad | Intensificación productiva | G.11, G.41, B.9 | Romero Domínguez et al. (2017), Autio et al. (2020), Reig et al. (2020) |
| Densidad media o sistemas extensivos | Estabilidad productiva | G.935, G.202, G.969 | Duan et al. (2023), Zhang et al. (2023) |
| Replante / presión patogénica del suelo | Resiliencia sanitaria | G.11, G.41, G.935 | Auvil et al. (2011), Robinson et al. (2012), Pește anu & Cumpanici (2024) |
| Déficit hídrico | Tolerancia a estrés | G.935, G.202 | Choi et al. (2020), Colpo et al. (2024) |
| Riego tecnificado intensivo | Alta eficiencia productiva | M.9, G.11, B.9 | Romero Domínguez et al. (2017), Casagrande Biasuz & Kalcsits (2022) |
| Mercado prémium | Calidad de fruto | G.11, G.41, G.935 | Robinson (2011), Nava et al. (2018) |
| Alta inversión | Tecnología intensiva | Serie Geneva | Robinson (2011), Pește anu & Cumpanici (2024) |
| Baja inversión | Establecimiento básico | M.9, M.26 | Auvil et al. (2011), Robinson et al. (2012) |

Nota: La matriz integra evidencia fisiológica, agronómica y fitosanitaria derivada de estudios en sistemas intensivos de manzano y ensayos multirregionales (NC-140 y literatura asociada). La aplicabilidad en Cuauhtémoc, Chihuahua, requiere validación local debido a la variabilidad edafoclimática regional.

**Cuadro 4. Respuesta agronómica, fisiológica y fitosanitaria de portainjertos de manzano bajo condiciones agroclimáticas de Chihuahua, México.**

| Año / periodo | Fuente | Ubicación y condición experimental | Portainjertos/antagonistas evaluados | Principales hallazgos | Implicación agronómica |
|---|---|---|---|---|---|
| 1984-1989 | Parra Quezada et al. (1990) | Campo, Bachíniva; cultivares “Rome Beauty”, “Golden Delicious”, “Red Delicious”; sistemas comerciales | M.9, M.26, M.7, MM.106, MM.111 | M.9 presentó la mayor eficiencia productiva (2.49 kg cm$^{-2}$ TCSA) y altos rendimientos | Confirma a M.9 como estándar para alta densidad y precocidad |
| 1993-1994 | Parra Quezada & Becerril Román (1999) | Campo, Bachíniva; “Starkspur Supreme Delicious”; análisis foliar nutrimental | EMLA.7, EMLA.26, P.22, MAC.1, MAC.39 | Relación inversa entre vigor y concentración de nutrimentos; toxicidad de Mn en portainjertos débiles | Evidencia fisiológica del efecto del vigor sobre la nutrición mineral |
| 1997 | Parra Quezada et al. (2001) | Campo con manejo de riego y fertilización | MM.111, MM.106, M.7, M.26 | Mayor biomasa en MM.111, MM.106 y M.7; menor crecimiento en M.26 | Diferencias claras en arquitectura y acumulación de biomasa |
| 2003 (seguimiento) | Romero Domínguez et al. (2017) | Campo, La Capilla de los Remedios; “Golden Delicious”; evaluación de vigor, eficiencia productiva y nutrición (N, P, K) | PiAu 56-83, PiAu 51-4, EMLA.26, G.935, G.41, G.16, B.10, J-TE-H, PAJAM2, M.9T337, B.9 | Mayor eficiencia en M.9T337, G.41, G.935 y G.16; mayor vigor en PiAu | Enanizantes incrementan eficiencia productiva y modifican nutrición foliar; los vigorosos reducen eficiencia por unidad de área |

**Cuadro 4. Respuesta agronómica... (continuación).**

| Año / periodo | Fuente | Ubicación y condición experimental | Portainjertos/antagonistas evaluados | Principales hallazgos | Implicación agronómica |
|---|---|---|---|---|---|
| 2010-2015 | Peña-Antillón et al. (2019) | Cuauhtémoc; "Royal Gala"; análisis fenológico | B.9, G.11, G.16, G.30, G.41, G.935, G.4210, G.6210, M.7, M.26, M.9 Pajam2, M.9T337 | El frío invernal afectó floración; el portainjerto no tuvo efecto significativo | La fenología está más determinada por el clima que por el portainjerto |
| 2017 | Ruiz-Cisneros et al. (2017) | Invernadero; patógenos de suelo; evaluación de patogenicidad | Varios, incluyendo G.935 y M.25 | G.935, Standard y M.25 mostraron 0 % de incidencia de patógenos | Evidencia de alta resistencia sanitaria en algunos portainjertos. |
| 2017 | Ruiz-Cisneros et al. (2017) | Ensayos *in vitro*; biocontrol de patógenos | Portainjertos: G.935, Estándar y M.25; antagonistas: *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp. | *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp. inhibieron > 90 % del crecimiento de *Phytophthora cactorum*. | Potencial del control biológico para el manejo de enfermedades radicales en portainjertos de manzano. |
| 2017-2020 | Cruz-Álvarez et al. (2025) | NC-140 (Canadá-México-Estados Unidos); Cuauhtémoc; "Honeycrisp" | G.30, G.969, G.202, G.41, G.11, M.9T337, M.26 EMLA, V.6 | Mayor productividad en G.969, G.11 y V.6 (hasta 35.3 t $ha^{-1}$) | Los portainjertos Geneva dominan bajo variabilidad climática regional |
| 2018 | Mares-Ponce de León et al. (2018) | Cuauhtémoc, Guerrero, Bachíniva y Namiquipa; rizósfera y microbiología del suelo | G.30 (y otros asociados) | Identificación de *Mortierella* spp. sin patogenicidad | Importancia del microbioma en la salud del sistema radical |
| 2020-2024 | Rascón-Castillo et al. (2024) | Universidad Autónoma de Chihuahua, Campus Cuauhtémoc; estrés hídrico controlado | B.9, M.9Nic29, G.41, G.202, G.890, G.210, G.30, M.7, MM.111, MM.109 | B.9 y M.9Nic29 mostraron mejor uso del agua y recuperación hídrica | Identificación de portainjertos clave para condiciones de sequía |

Nota: La matriz resume cronológicamente la evidencia generada en Chihuahua sobre la respuesta agronómica, fisiológica y fitosanitaria. de distintos portainjertos de manzano, integrando ensayos de campo, invernadero y colaboraciones internacionales (NC-140). Los hallazgos reflejan la evolución de la investigación regional desde los años ochenta hasta la actualidad, mostrando cómo factores como vigor, nutrición, resistencia a patógenos y tolerancia a estrés hídrico condicionan la productividad y sostenibilidad de los huertos. La aplicabilidad práctica requiere validación continua bajo condiciones locales de clima, suelo y presión fitosanitaria.