



Grafting propagation of selected genotypes from a provenance trial of *Cedrela odorata* L.

Clonación por injerto de genotipos seleccionados de un ensayo de procedencias de *Cedrela odorata* L.

© Esther Paredes-Díaz¹; © Benito González-Jiménez^{2*}; © Ramiro Puc-Kauil¹;
© Marcos Jiménez-Casas²; © Norberto Silva-Pérez²

¹Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza. Av. Tecnológico s/n, El Huasteco. C. P. 73049. Venustiano Carranza, Puebla, México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: benitoforestal@hotmail.com

Abstract

Introduction. Grafting is the union of two plants of different genetic origin that interact with each other. Graft performance may be influenced by the clone from which the scions are derived.

Objective. To evaluate the effect of clone on grafting success and initial scion growth in crown grafts of *C. odorata*.

Materials and methods. Crown grafts were performed using scions from five *C. odorata* (CR-A, CR-B, CR-C, CR-D and CR-E), morphologically selected from a provenance trial in the Sierra Norte de Puebla, Mexico. Grafting success, initial growth in height and diameter, number of buds, and graft crown diameter were evaluated using a randomized complete block design.

Results. Statistically significant differences ($P < 0.05$) due to clone effect were observed for all variables except grafting diameter (mean = 13.1 mm). After two months, clone CR-E showed 5, 10 and 35 % higher grafting success than clones CR-B, CR-A and CR-C, respectively, whereas clone CR-D showed no graft take. After six months, grafts with scions from clone CR-B grew 19, 21 and 57 cm more in height than grafts with scions from clones CR-C, CR-A and CR-E, respectively. On average, grafts developed 26 lateral buds per plant and a crown diameter of 90 cm.

Conclusions. Clone significantly influences grafting success, initial height growth, number of buds and crown diameter in crown grafts of *C. odorata*.

Keywords: red cedar, graft compatibility, crown grafting, vegetative propagation, grafting success.

Resumen

Introducción. El injerto es la unión entre dos plantas de origen genético diferente que interactúan entre sí. En *Cedrela odorata* L., el clon del cual se obtienen las varetas podría influir en el desempeño del injerto.

Objetivo. Evaluar el efecto del clon sobre el prendimiento y crecimiento inicial de la vareta en injertos de corona de *C. odorata*.

Materiales y métodos. Se hicieron injertos de corona con varetas de cinco clones de *C. odorata* (CR-A, CR-B, CR-C, CR-D y CR-E), seleccionados morfológicamente de un ensayo de procedencias en la Sierra Norte de Puebla, México. El prendimiento, crecimiento inicial en altura y diámetro, número de yemas y diámetro de copa del injerto se evaluaron en un diseño en bloques completos al azar.

Resultados. Se observaron diferencias estadísticas ($P < 0.05$) por efecto del clon en todas las variables, excepto en el diámetro del injerto (13.1 mm en promedio). A los dos meses, el CR-E tuvo 5, 10 y 35 % mayor prendimiento que los clones CR-B, CR-A y CR-C, respectivamente, mientras que el CR-D no tuvo prendimiento. A los seis meses, los injertos con varetas del CR-B crecieron 19, 21 y 57 cm más que los injertos con varetas de CR-C, CR-A y CR-E, respectivamente. Los injertos desarrollaron en promedio 26 yemas laterales por planta y diámetro de copa de 90 cm.

Conclusiones. El clon influye significativamente en el prendimiento y crecimiento inicial en altura, número de yemas y diámetro de copa del injerto de corona en *C. odorata*.

Palabras clave: cedro rojo, compatibilidad del injerto, injerto de corona, propagación vegetativa, prendimiento.

Please cite this article as follows (APA 7): Paredes-Díaz, E., González-Jiménez, B., Puc-Kauil, R., Jiménez-Casas, M., & Silva-Pérez, N. (2026). Grafting propagation of selected genotypes from a provenance trial of *Cedrela odorata* L. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 32, e25002. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2025.01.002>



Introduction

Cedrela odorata L. (red cedar) belongs to the family Meliaceae and is naturally distributed along the Gulf of Mexico and Pacific slopes, as well as in Central America, South America, and the Caribbean islands (Gálvez López et al., 2020). This tropical species has high commercial value due to its rapid growth and wood characteristics, including hardness, color, aroma and resistance to fungal and insect attack (Cob Uicab et al., 2023). In México, *C. odorata* is one of the most important species in the forest industry, with great potential in tropical regions for the establishment of agroforestry systems and commercial forest plantations, with rotation periods of 20 to 25 years (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], 2023; Olvera-Moreno et al., 2022).

Despite its importance, *C. odorata* is listed as subject to Special Protection under the Mexican Official Standard NOM-059-SEMARNAT 2010 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010), because its natural populations have been fragmented and reduced by deforestation and dysgenic harvesting (Hernández Ramos et al., 2018). In addition, plantations of this meliaceous species are severely affected during the first three to six years by larvae of *Hypsipyla grandella* Zeller (family Pyralidae), which bore into the internal tissue of the pith of terminal shoots, causing the plant to produce multiple shoots and forked stems that negatively affect its growth and commercial value (Cibrián Tovar, 2016; Paul & Weber, 2013).

To rescue, conserve, and improve the quality and production of *C. odorata* germplasm, genetic improvement programs have been developed that include the establishment of asexual seed orchards using clonal plants (Gálvez López et al., 2020; Olvera-Moreno et al., 2022). Therefore, it is necessary to explore efficient alternatives for asexual propagation through grafting that fully preserve the genetic information of selected phenotypically superior trees and enable the propagation of mature trees that are difficult to reproduce by other methods (Cob Uicab et al., 2023; Hartmann et al., 2014).

Grafting has been widely used in fruit growing and horticulture; however, in forest species there are problems with grafting success due to various factors (Barrera-Ramírez et al., 2021; Castro-Garibay et al., 2017). Some authors have identified the clone as an important source of variation in grafting success, growth, survival and graft morphology (González-Jiménez et al., 2022; Warschefsky et al., 2016). Other studies on red cedar indicate that the clone influences *in vitro* rooting, seed morphological characteristics, and the basic wood density of branches (Honorato Salazar & Sánchez Monsalvo, 2018; Sampayo-Maldonado et al., 2016).

Introducción

Cedrela odorata L. (cedro rojo) pertenece a la familia Meliaceae y se distribuye de forma natural en las vertientes del golfo de México y del Pacífico, así como en Centroamérica, Sudamérica y las islas del Caribe (Gálvez López et al., 2020). Esta especie tropical es de alto valor comercial por su crecimiento rápido y características de la madera: dureza, color, aroma y resistencia al ataque de hongos e insectos (Cob Uicab et al., 2023). En México, *C. odorata* es una de las especies más importantes en la industria forestal con gran potencial en regiones tropicales para el establecimiento de sistemas agroforestales y plantaciones forestales comerciales, con turno de 20 a 25 años (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], 2023; Olvera-Moreno et al., 2022).

A pesar de su importancia, *C. odorata* está catalogada como sujeta a protección especial en la Norma Oficial Mexicana 059-SEMARNAT 2010 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2010), porque sus poblaciones naturales se han fragmentado y disminuido por la deforestación y extracción disgénica (Hernández Ramos et al., 2018). Además, las plantaciones de esta meliácea son altamente afectadas en los primeros tres a seis años por las larvas de *Hypsipyla grandella* Zeller (familia Pyralidae), las cuales perforan el tejido interno de la médula de los brotes terminales, lo que provoca que la planta genere brotes múltiples y tallos bifurcados que afectan su crecimiento y valor comercial (Cibrián Tovar, 2016; Paul & Weber, 2013).

Para rescatar, conservar y mejorar la calidad y producción del germoplasma de *C. odorata* se han desarrollado programas de mejoramiento genético que contemplan el establecimiento de huertos semilleros asexuales a partir de planta clonal (Gálvez López et al., 2020; Olvera-Moreno et al., 2022). Por ello, es necesaria la exploración de alternativas eficientes de propagación por vía asexual mediante injerto que mantengan, de manera íntegra, la información genética de los árboles fenotípicamente superiores seleccionados y la propagación de árboles adultos que por otras vías resulta difícil (Cob Uicab et al., 2023; Hartmann et al., 2014).

La técnica de injerto ha sido utilizada ampliamente en fruticultura y horticultura; sin embargo, en especies forestales existen problemas de prendimiento por diversos factores (Barrera-Ramírez et al., 2021; Castro-Garibay et al., 2017). Algunos autores han identificado al clon como una fuente importante de variación en el prendimiento, crecimiento, supervivencia y morfología de los injertos (González-Jiménez et al., 2022; Warschefsky et al., 2016). Otras investigaciones en cedro rojo señalan que el clon influye en el enraizamiento *in vitro*, en las características morfológicas de semillas y en la densidad básica de la madera de ramas (Honorato

The propagation of *C. odorata* has been achieved through grafting; however, information on clonal response during the first months after grafting is scarce, as performance has only been evaluated in graft-derived ramets several years after field establishment (Sampayo-Maldonado et al., 2019). Therefore, it is necessary to generate information that increases the probability of success in *C. odorata* grafting using phenotypically or genotypically superior trees; supports the production of planting stock required for the establishment of asexual seed orchards; and enables the development of donor mother plants for cutting production for large-scale, high-productivity clonal plantations with uniform characteristics desirable to the forest industry (Fonseca-González et al., 2021). In this context, the objective of the present study was to evaluate the effect of clone on grafting success and initial scion growth in crown grafts of *C. odorata* selected from a provenance-progeny trial. The research hypothesis proposes that the clone used to obtain *C. odorata* scions may affect grafting success and growth.

Materials and Methods

Rootstocks

Half-sibling rootstocks were used, produced from seeds of a single *C. odorata* tree showing outstanding total height, diameter at breast height, and clear stem height, selected in the Azcatlán ejido, Zihuateutla, Puebla. For their production, seeds were sown in a seedbed in May 2022. Subsequently, seedlings were transplanted into black polyethylene bags measuring 12.5 x 25 cm, containing a substrate composed of organic matter, perlite, and soil in a 60 %, 10 % and 30 % ratio, respectively, supplemented with controlled-release fertilizer (1 g·L⁻¹) Osmocote® 14-14-14 of N-P-K (Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2019).

The rootstocks were produced under 70 % shade netting in the semi-technical nursery of the Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza (ITSVC), municipality of Venustiano Carranza, Puebla, Mexico. They were irrigated using a lateral-arm sprinkler system mounted on rails for nursery use, on average twice per week. At the time of grafting, the rootstocks were 22 months old, with an average height of 1.5 ± 0.01 m and an average diameter of 11.0 ± 0.2 mm at the grafting zone, and were defoliated, as the species is deciduous. The stem had a dominant apical bud that was phenologically at the end of dormancy, i.e., just beginning to grow, while the lateral buds were still in dormancy (Figure 1a).

Provenance-Progeny Trial

Scions were collected from trees planted in a provenance trial established at ITSVC at 330 m above sea level, between coordinates 20° 28' 26.3" N and 97°

Salazar & Sánchez Monsalvo, 2018; Sampayo-Maldonado et al., 2016).

La propagación de *C. odorata* se ha logrado por medio de injerto; no obstante, la información sobre la respuesta del clon en los primeros meses después de haberse injertado es escasa; únicamente se ha evaluado el desempeño de los rametos a partir de injerto, varios años después de haberse establecido en campo (Sampayo-Maldonado et al., 2019). Por ello, es necesario generar información que aumente la probabilidad de éxito en los injertos de *C. odorata* a partir de árboles fenotípica o genotípicamente superiores; la obtención de planta requerida en el establecimiento de huertos asexuales; y la generación de plantas madre donadoras de estacas para la producción masiva en plantaciones clonales de alta productividad con características uniformes deseables en la industria forestal (Fonseca-González et al., 2021). En tal contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto del clon en el prendimiento y crecimiento inicial de la varetta en injertos de corona de *C. odorata*, seleccionados de un ensayo de procedencias-progenie. La hipótesis de investigación señala que el clon del cual se obtienen las varetas de *C. odorata* podría generar variación en el prendimiento y crecimiento del injerto.

Materiales y métodos

Portainjertos

Se utilizaron portainjertos de medios hermanos producidos a partir de semillas de un solo árbol de *C. odorata* con características sobresalientes en altura total, diámetro normal y altura del fuste limpio, seleccionado en el ejido Azcatlán, Zihuateutla, Puebla. Para su producción, la semilla se sembró en almácigo en mayo de 2022. Posteriormente, la planta se trasplantó a bolsa de polietileno negra de 12.5 x 25 cm con un sustrato compuesto de materia orgánica, perlita y suelo en una proporción de 60, 10 y 30 %, respectivamente, adicionado con fertilizante de liberación controlada (1 g·L⁻¹) de Osmocote® 14-14-14 de N-P-K (Instituto Nacional de Bosques [INAB], 2019).

Los portainjertos se produjeron bajo malla sombra al 70 % en el vivero semitecnificado del Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza (ITSVC), municipio de Venustiano Carranza, Puebla, México. Estos se regaron con un robot de brazos laterales para riego por aspersion y desplazamiento sobre rieles para vivero, en promedio dos veces por semana. Al momento del injerto, los portainjertos tenían 22 meses de edad con 1.5 ± 0.01 m de altura y 11.0 ± 0.2 mm de diámetro promedio en la zona del injerto y estaban defoliados, por ser una especie caducifolia. El tallo tenía una yema apical dominante que fenológicamente estaba al final de la dormancia; es decir, reiniciando el crecimiento, mientras que las yemas laterales permanecían en dormancia (Figura 1a).

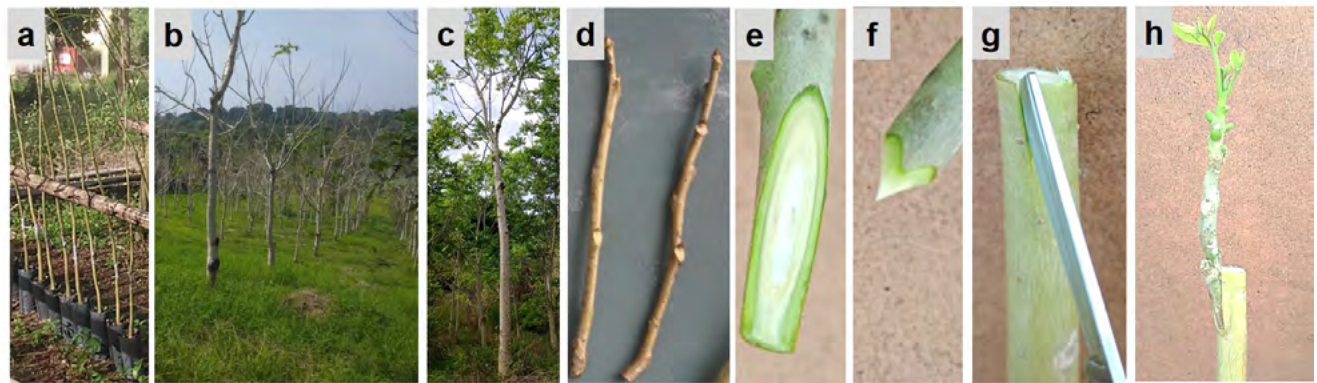


Figure 1. Plant material of *Cedrela odorata* for intra-specific crown grafting: a) rootstock, b) provenance trial, c) general characteristics of the trees selected, d) scions, e and f) cuts at the base of the scion, g) cuts on the rootstock, h) crown graft.

Figura 1. Material vegetal de *Cedrela odorata* para injertos de corona intraespecíficos: a) portainjerto, b) ensayo de procedencias, c) características generales de los árboles seleccionados, d) varetas, e y f) cortes en la base de la varetta, g) cortes en el portainjerto, h) injerto de corona.

41° 59.0' W. This area has a warm humid climate with abundant summer rainfall (Cw), and an average annual temperature and precipitation of 24 °C and 1450 mm, respectively (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2024; Puc-Kauil et al., 2024).

The provenance trial was conducted between March and May 2018 with 6- to 8-month-old seedlings produced from seeds of phenotypically selected trees (total height, diameter at breast height, clear stem height, stem straightness, stem form, forking, and severity of damage caused by *H. grandella*) in the species' natural distribution area. The trial included 64 red cedar families: 23 from Veracruz, 17 from Puebla, 10 from Hidalgo, 11 from San Luis Potosí and three from Tamaulipas. A randomized complete block design with 16 blocks was used, with each block representing the 64 families (8 x 8), a spacing of 3 x 3 m between plants and a total of 1024 trees (Figure 1b).

Tree selection

In March 2024, five six-year-old trees (control codes CR-A, CR-B, CR-C, CR-D and CR-E) were selected from the *C. odorata* provenance-progeny trial based on their superior total height, diameter at breast height and stem straightness (Table 1). Damage from the meliaceae shoot borer, *H. grandella*, was observed starting at 2.5 m in height. Phenologically, the trees showed initial growth of terminal buds on the branches, with a lateral bud in dormancy at the base of each leaf (Figure 1c). It is important to note that, for scion collection and grafting, the five trees were assumed to be healthy; however, three months after grafting, a phytosanitary issue was detected in the ortet of clone CR-D (defoliation, yellowing leaves and some dead branches).

Ensayo de procedencias-progenie

Las varetas se recolectaron de árboles plantados en un ensayo de procedencias establecido en el ITSVC a 330 m de altitud, entre las coordenadas 20° 28' 26.3" LN y 97° 41' 59.0" LO. Esta zona presenta clima cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (Cw), temperatura y precipitación media anual de 24 °C y 1450 mm, respectivamente (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2024; Puc-Kauil et al., 2024).

El ensayo de procedencias se realizó entre marzo y mayo de 2018 con plantas de 6 a 8 meses producidas a partir de semilla de árboles seleccionados fenotípicamente (altura total, diámetro normal, altura de fuste limpio, rectitud, forma del fuste, bifurcaciones y nivel de severidad del daño causado por *H. grandella*) dentro del área de distribución natural de la especie. El ensayo estuvo integrado por 64 familias de cedro rojo: 23 de Veracruz, 17 de Puebla, 10 de Hidalgo, 11 de San Luis Potosí y tres de Tamaulipas. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con 16 bloques y cada bloque estuvo representado por las 64 familias (8 x 8), con espaciamiento entre plantas de 3 x 3 m y 1024 árboles en total (Figura 1b).

Selección de árboles

En marzo de 2024 se seleccionaron cinco árboles (clave de control CR-A, CR-B, CR-C, CR-D y CR-E) de seis años del ensayo de procedencias-progenie de *C. odorata* con base en sus características superiores en altura, diámetro normal y rectitud de fuste (Cuadro 1). El daño por el barrenador de yemas de meliáceas, *H. grandella*, se presentó a partir de los 2.5 m de altura. Fenológicamente, los árboles presentaban el inicio del crecimiento de las yemas terminales de las ramas; y en

Table 1. Identification codes and origin of the *Cedrela odorata* trees selected for graft propagation in a provenance trial in the Sierra Norte de Puebla, Mexico.

Cuadro 1. Clave de identificación y origen de los árboles seleccionados de *Cedrela odorata* para su propagación por injerto en un ensayo de procedencias en la Sierra Norte de Puebla, México.

Code / Clave	Total height (m) / Altura total (m)	Diameter at breast height (cm) / Diámetro normal (cm)	Family / Familia	Origin / Procedencia
CR-A	8	11.9	22	Veracruz
CR-B	7	11.6	38	Puebla
CR-C	7	12.0	45	Puebla
CR-D	6	9.8	17	Veracruz
CR-E	9	11.6	45	Puebla
Average / Promedio	7.4	11.4		

Scion preparation

Grafting was carried out on March 15, 2024, in the ITSVC nursery. In the morning, 10 branches of approximately 2 m in length were cut from the lower part of the crown of each tree. The branches were pruned at their base (attached to the main trunk) using a curved saw with extension. The cut branches were transported to the nursery along with their corresponding donor tree identification code.

Thirty scions were cut per tree (10 more than required) from the terminal ends of the pruned branches (Álvarez López, 2019), each 12 cm in length, with an average diameter of 7.8 ± 0.2 mm, one terminal bud, and four to five lateral buds alive but dormant (Figure 1d). The scions were washed with commercial liquid soap and $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ sodium hypochlorite, rinsed with running water, and placed in a solution of water with Captan® ($2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) for 10 minutes. Finally, they were stored in a cooler with ice to keep them hydrated and fresh until grafting (González-Jiménez et al., 2022).

Crown grafting

The crown grafting technique proposed by Hartmann et al. (2014) was applied, modified for red cedar, and documented for this species (Cob Uicab et al., 2023). The leaves of the scion were pruned at their base with pruning shears, taking care not to damage the lateral buds. The scion length was adjusted to 10 cm using Felco® no. 2 pruning shears. Next, a diagonal cut of approximately 2.5 cm was made on one side of the scion base to leave a single exposed plane (Figure 1e). On the opposite side of the scion base, a cut of ± 3 mm was made to form a pointed tip (Figure 1f). The rootstock was then topped at a height of 25 cm from the base of the main stem. At the end of the topped stem, a vertical cut of approximately 1.5 cm was made through the bark down to the xylem. Using a bark lifter, the bark was gently separated at the upper corners

la base de cada hoja, una yema lateral en dormancia (Figura 1c). Es importante mencionar que, para la recolecta de varetas e injertado, se asumió que los cinco árboles estaban sanos; sin embargo, tres meses después del injertado se detectó un problema fitosanitario en el ortet del clon CR-D (defoliación, hojas de color amarillo y algunas ramas secas).

Preparación de varetas

Los injertos se realizaron el 15 de marzo de 2024 en el vivero del ITSVC. Por la mañana se cortaron 10 ramas de aproximadamente 2 m de longitud de la parte baja de la copa de cada árbol. Las ramas se podaron desde su base (pegada al tronco principal del árbol) con serrucho curvo extensible. Las ramas cortadas se trasladaron al vivero con su respectiva clave de control del árbol donador.

Se cortaron 30 varetas por árbol (10 más de las requeridas) con una longitud de 12 cm de los extremos terminales de las ramas podadas (Álvarez López, 2019), 7.8 ± 0.2 mm de diámetro promedio, una yema terminal y de cuatro a cinco yemas laterales vivas, pero en dormancia (Figura 1d). Las varetas se lavaron con jabón líquido comercial y $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ de hipoclorito de sodio, se enjuagaron con agua corriente y se depositaron en una solución de agua con Captan® ($2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) durante 10 min. Finalmente, se colocaron en una nevera con hielo para mantenerlas hidratadas y frescas durante el injertado (González-Jiménez et al., 2022).

Injerto de corona

Se aplicó la técnica de injerto de corona propuesta por Hartmann et al. (2014) modificada para cedro rojo, la cual está documentada para esta especie (Cob Uicab et al., 2023). Las hojas de las varetas se podaron con tijeras de mano desde su base, pero sin dañar las yemas laterales. Se ajustó la longitud de las varetas a 10 cm con tijeras de mano Felco® núm. 2. Enseguida, en un lado de la base de la vareta se hizo un corte en diagonal

of the cut to facilitate scion insertion (Figure 1g). The scion was immediately placed by sliding it downward until full cambial contact between both parts was achieved (Figure 1h). Finally, the graft union was covered helically with 3-cm-wide Vitafilm plastic, completely enclosing the graft point with enough pressure to secure cambial contact between the scion and rootstock (González-Jiménez et al., 2023). An aluminum tag with identification data was attached for experimental control.

Graft maintenance

The grafts were maintained under nursery conditions at ITSVC, with an average temperature of 30 °C and relative humidity of 75 % during grafting success. Cob Uicab et al. (2022) recommend post-grafting maintenance activities; therefore, the grafts were irrigated on average twice per week, and soluble Peters Professional® 9-45-15 N-P-K fertilizer was applied monthly at a dose of 1 g·L⁻¹. Three and a half months later, successfully grafted plants were transplanted into 4-L black polyethylene bags containing a substrate composed of compost, soil and perlite in a 50:35:15 ratio, respectively, supplemented with 1.5 g·L⁻¹ Osmocote® 14-14-14 N-P-K. In addition, 10 g of Nitrofozca® (12-12-17 N-P-K) was applied per plant.

Variables studied

Grafting success (%) was evaluated two months after grafting, while height (cm), diameter (mm), number of lateral buds, and crown diameter (cm) were measured six months after grafting. Height was measured with a measuring taper from the graft union to the terminal bud, and diameter was measured 1 cm above the graft union using a digital caliper (González-Jiménez et al., 2023). The number of buds was determined by counting the lateral buds formed at the leaf insertion points along the main stem of the graft, and crown diameter was measured with a measuring tape as the average of two measurements of the horizontal projection of the crown in the north-south and east-west directions (Rodríguez-Laguna et al., 2009).

Experimental design

The experiment was conducted under a randomized complete block design. Scions from five clones were evaluated as treatments (T1: CR-A, T2: CR-B, T3: CR-C, T4: CR-D and T5: CR-E). Four blocks were established, with five grafts per experimental unit, resulting in a total of 100 grafts.

Data for the evaluated variables were subjected to the Shapiro-Wilk normality test. Percentage and count variables that did not meet the normality assumption

de aproximadamente 2.5 cm, para dejar un solo plano expuesto (Figura 1e). Después, del lado opuesto de la base de la varetta se hizo un corte de ± 3 mm para formar una punta (Figura 1f). Por otro lado, el portainjerto se decapitó a una altura de 25 cm a partir de la base del tallo principal. En el extremo del tallo decapitado se hizo un corte vertical de ± 1.5 cm sobre la corteza hasta tocar el xilema. Con un removedor de corteza se separó la corteza en las esquinas de la parte superior del corte, para facilitar la inserción de la varetta (Figura 1g). De inmediato se colocó la varetta deslizándola hacia abajo hasta tener contacto total del cámbium de ambas partes (Figura 1h). Finalmente, la zona de injerto se cubrió, helicoidalmente, con plástico Vitafilm de 3 cm de ancho hasta cubrir por completo el punto de unión con la suficiente presión para fijar el cámbium de la varetta con el del portainjerto (González-Jiménez et al., 2023). Se colocó una etiqueta de aluminio con los datos de identificación, para el control del experimento.

Mantenimiento del injerto

Los injertos se mantuvieron en condiciones de vivero en el ITSVC a una temperatura media de 30 °C y humedad relativa de 75 % durante el prendimiento. Cob Uicab et al. (2022) sugieren actividades de mantenimiento después del injertado, por ello, los injertos se regaron en promedio dos veces por semana y cada mes se aplicó el fertilizante soluble Peters Professional® 9-45-15 de N-P-K a dosis de 1 g·L⁻¹. A los tres meses y medio, los injertos prendidos se trasplantaron en bolsas de polietileno negra de 4 L con un sustrato integrado por composta, tierra y perlita en proporción 50-35-15, respectivamente, adicionado con 1.5 g·L⁻¹ de Osmocote® 14-14-14 de N-P-K. Asimismo, se agregaron 10 g de fertilizante Nitrofozca® (12-12-17 de N-P-K) por planta.

Variables evaluadas

El prendimiento del injerto (%) se evaluó a los dos meses; la altura (cm), diámetro (mm), número de yemas laterales y diámetro de copa (cm), a los seis meses después de injertados. La altura se midió con flexómetro desde el punto de unión hasta la yema terminal y el diámetro se evaluó 1 cm por arriba del punto de unión con vernier digital (González-Jiménez et al., 2023). El número de yemas se obtuvo mediante el conteo de yemas laterales formadas donde se insertan las hojas a lo largo del tallo principal del injerto y el diámetro de la copa se evaluó con flexómetro a partir del promedio de dos mediciones de la proyección horizontal de la copa en dirección norte-sur y este-oeste (Rodríguez-Laguna et al., 2009).

Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño en bloques

were transformed using the functions $[T = \arcsine(\sqrt{Y})]$ and $[T = \log_{10}(Y)]$, respectively (Sampayo-Maldonado et al., 2016). An ANOVA and Turkey's multiple mean comparison test were applied to all variables using the statistical software SAS version 9.4 (Statistical Analysis System [SAS Institute], 2013), based on the following statistical model:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

where, Y_{ij} = value of the response variable corresponding to the replication j r of the treatment i ; μ = overall mean; T_i = effect of the i th clone; β_j = effect of the block j ; ϵ_{ij} = experimental error; i = clone CR-A, CR-B, CR-C, CR-D and CR-E; j = 1, 2, 3 and 4 blocks. Finally, data for percentage and count variables were back-transformed to their original units using the functions $[Y = 100 \sin^2(T)]$ and $[Y = 10^T]$, respectively.

Results and Discussion

The clone effect was statistically significant ($P \leq 0.05$) for all variables, except for scion stem diameter. Two months after grafting *C. odorata*, an average graft success rate of 42 % was obtained; after six months, the grafts had grown more than 1 m in height, reached 13 mm in stem diameter, 90 cm in crown diameter, and developed 26 buds per graft on average (Table 2). After successful grafting, no graft mortality was observed; therefore, survival remained unchanged until the final evaluation at six months. Similarly, Barrera-Ramírez et al. (2021) reported that more than 50 % of grafts in *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) Harrison experienced graft success problems within the first 40 days.

Grafting success

Grafts of clones CR-E and CR-B showed the highest graft success rates, at 65 and 60 %, respectively, differing significantly from clones CR-C (30 %) and CR-

al azar. Se probaron varetas de cinco clones que correspondían a los tratamientos (T1: CR-A, T2: CR-B, T3: CR-C, T4: CR-D y T5: CR-E). Se establecieron cuatro bloques con cinco injertos como unidad experimental; en total se generaron 100 injertos.

Los datos de las variables evaluadas se sometieron a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Los datos de las variables en porcentaje y número, al no cumplir con el supuesto de normalidad, se transformaron con las funciones $[T = \arcseno(\sqrt{Y})]$ y $[T = \log_{10}(Y)]$, respectivamente (Sampayo-Maldonado et al., 2016). A todas las variables se aplicó un análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey en el programa estadístico SAS 9.4 (Statistical Analysis System [SAS Institute], 2013), con base en el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

donde, Y_{ij} = valor de la variable respuesta correspondiente a la repetición j del tratamiento i ; μ = media general; T_i = efecto del i ésimo clon; β_j = efecto del bloque j ; ϵ_{ij} = error experimental; i = clon CR-A, CR-B, CR-C, CR-D y CR-E; j = 1, 2, 3 y 4 bloques. Finalmente, los datos de las variables en porcentaje y número se retransformaron a las unidades originales con las funciones $[Y = 100 \text{ seno}^2(T)]$ y $[Y = 10^T]$, respectivamente.

Resultados y discusión

El efecto del clon fue estadísticamente diferente ($P \leq 0.05$) en todas las variables, excepto en el diámetro del tallo del injerto. A los dos meses del injerto de *C. odorata*, se obtuvo en promedio 42 % de prendimiento; a los seis meses, los injertos crecieron más de 1 m de altura, 13 mm de diámetro del tallo, 90 cm de diámetro de copa y desarrollaron 26 yemas por injerto (Cuadro 2). Después del prendimiento los injertos no murieron, de modo que la supervivencia se mantuvo igual hasta la

Table 2. ANOVA and mean comparison of the variables evaluated in *Cedrela odorata* grafts as affected by clone.

Cuadro 2. Análisis de varianza y prueba de medias de las variables evaluadas en injertos de *Cedrela odorata*, por efecto del clon.

Source of variation/ Fuente de variación	Grafting success (%)/ Prendimiento (%)	Height (cm)/ Altura (cm)	Diameter (mm)/ Diámetro (mm)	Lateral buds/ Yemas laterales	Crown diameter (cm)/ Diámetro de copa (cm)
P	0.0101*	0.0080*	0.5123	0.0078*	0.0007*
CR-A	55.0 ± 15 ab	121.4 ± 4.0 ab	13.1 ± 0.4 a	30.8 ± 0.9 a	86.0 ± 3.2 b
CR-B	60.0 ± 14 a	143.0 ± 5.0 a	13.5 ± 0.5 a	26.8 ± 0.9 ab	108.0 ± 2.8 a
CR-C	30.0 ± 13 b	123.7 ± 9.0 ab	12.5 ± 0.4 a	28.2 ± 1.1 a	81.8 ± 2.1 b
CR-D	00.0 ± 0 c	-	-	-	-
CR-E	65.0 ± 10 a	85.8 ± 8.0 b	13.4 ± 0.2 a	21.0 ± 1.9 b	84.9 ± 4.6 b
Average/ Promedio	42.0 ± 7.2	118.5 ± 10.0	13.1 ± 0.2	26.7 ± 1.8	90.2 ± 5.2

Means followed by different letters in the same column are statistically different according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

Medias con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

D, which showed no favorable response (0 %) (Table 2). In other studies, graft success ranged from 70 to 82.5 % when evaluating scions from four clones of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. (González-Jiménez et al., 2023) and from 20 to 98 % among 25 clones of *Castanea sativa* Mill. (Kulac & Özkuru, 2021). Because a grafted plant is composed of two organs of different genetic origin that are forced to interact, varying degrees of graft incompatibility may occur depending on the characteristics of each clone (Darikova et al., 2011; Gautier et al., 2019). Similarly, a study on *Pinus pseudostrabus* Lindl. demonstrated that clone identity influences graft success (Barrera-Ramírez et al., 2024).

In the present study, the *C. odorata* clone from which the scions were obtained showed a certain degree of incompatibility with the rootstock, even though all five clones belonged to the same species. This indicates that scions from different genotypes of the same species possess inherent characteristics that may promote or hinder compatibility with the rootstock (González-Jiménez et al., 2023). Castro-Garibay et al. (2017) note that the shape of the cambium and the thickness of the bark in the graft components are important factors, as differences can lead to incompatibility. It is possible that clones CR-E and CR-B had better cambium alignment and coupling compared to clone CR-C. Therefore, performing anatomical cuts of both the scion and the rootstock prior to grafting is crucial for making optimal decisions regarding the plant material to be used.

In addition to possible physical barriers related to tissue anatomy in clones with lower graft success, the physiological characteristics of the evaluated clones must also be considered. Pina et al. (2017) indicate that tissue physiology can influence graft incompatibility; in particular, when the differentiation of new cambial cells occurs at a lower rate, a mechanically weak union with defective structural development is produced.

It has been reported that scions from a given clone may have greater affinity for certain rootstock families (González-Jiménez et al., 2023). Furthermore, it should be noted that using seed-derived rootstocks, which are half-siblings, introduces variation within the clone, since each rootstock represents a different genotype, and graft success depends on the efficiency of their interaction (Gautier et al., 2019; Olvera-Moreno et al., 2022).

The negative graft success observed for clone CR-D can be attributed to phytosanitary problems that developed in the ortet three months after grafting, even though at the time of collection the scions showed no visible signs of phytosanitary issues and were assumed to be healthy. Therefore, it is recommended to conduct

última evaluación a los seis meses. De manera similar, Barrera-Ramírez et al. (2021) detectaron que más del 50 % de los injertos en *Pinus pseudostrabus* var. *oaxacana* (Mirov) Harrison tuvieron problemas de prendimiento en los primeros 40 días.

Prendimiento

Los injertos del clon CR-E y CR-B tuvieron los mayores porcentajes de prendimiento con 65 y 60 %, respectivamente, mostrando diferencias respecto a los clones CR-C (30 %) y CR-D, el cual no tuvo una respuesta favorable (0 %) (Cuadro 2). En otros estudios, el prendimiento del injerto varió de 70 a 82.5 % al evaluar varetas de cuatro clones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. (González-Jiménez et al., 2023) y de 20 a 98 % en 25 clones de *Castanea sativa* Mill. (Kulac & Özkuru, 2021). El injerto, al ser una planta compuesta por dos órganos de origen genético diferente que fueron forzados a interactuar, puede presentar incompatibilidad en grado distinto, dependiendo de las características de cada clon (Darikova et al., 2011; Gautier et al., 2019). En un estudio con *Pinus pseudostrabus* Lindl. también se demostró que el clon genera diferencias en el prendimiento del injerto (Barrera-Ramírez et al., 2024).

En el presente estudio, el clon de *C. odorata*, del cual se obtuvieron las varetas, genera cierto grado de incompatibilidad con el portainjerto, aunque los cinco clones hayan sido de la misma especie; es decir, que las varetas de genotipos de una misma especie presentan características propias que favorecerán o no la compatibilidad con el portainjerto (González-Jiménez et al., 2023). Castro-Garibay et al. (2017) mencionan que es importante considerar la forma del cámbium y el grosor de la corteza de las partes que integran el injerto, ya que pueden generar incompatibilidad si no son similares. Quizá para los clones CR-E y CR-B hubo mejor alineación y acoplamiento del cámbium, en comparación con el clon CR-C. Por ello, es importante realizar cortes anatómicos de la vareta y del portainjerto antes de injertarse, con el fin de tomar decisiones adecuadas de los materiales vegetales a utilizar.

Además de las posibles barreras físicas relacionadas con la anatomía de los tejidos en los clones con menor prendimiento, se deben considerar los aspectos fisiológicos propios de los clones evaluados. Pina et al. (2017) indican que la fisiología de los tejidos puede influir en la incompatibilidad del injerto; particularmente, cuando la diferenciación de nuevas células de cámbium ocurre con menor intensidad se produce una unión mecánicamente débil con un desarrollo estructural defectuoso.

Se ha reportado que las varetas de un clon pueden tener mayor afinidad por ciertas familias de portainjertos

a careful inspection of the trees selected for cloning and to use scions only from healthy, vigorous, and phytosanitary problem-free trees to ensure a higher probability of grafting success (Cob Uicab et al., 2022).

Graft growth

Six months after grafting, clone CR-B had the greatest height growth, reaching approximately 1.5 m, which was 57, 21 and 19 cm higher than clones CR-E, CR-A and CR-C, respectively (Table 2; Figure 2a-d). No significant differences were observed in graft stem diameter among clones, ranging from 12.5 to 13.5 mm. In addition to the genotype-determined growth characteristics of each tree, scions of clone CR-B may have shown higher efficiency in water and nutrient uptake (Barrera-Ramírez et al., 2024). This was reflected in greater growth compared to clone CR-E. Furthermore, the potentially deficient formation

(González-Jiménez et al., 2023). Por otra parte, se debe considerar que el uso de portainjertos producidos a partir de semilla, debido a que son medios hermanos, genera variación en el clon, ya que cada portainjerto es un genotipo diferente y el éxito del injerto depende de la eficiencia de su interacción (Gautier et al., 2019; Olvera-Moreno et al., 2022).

La respuesta negativa en el prendimiento de los injertos del clon CR-D se puede atribuir a los problemas fitosanitarios que presentó este ortet tres meses después del injertado, aunque al momento de la recolecta, las varetas no presentaban signos visibles de problemas fitosanitarios y se asumió que estaban sanas. Por eso se sugiere hacer una inspección cuidadosa de los árboles seleccionados para clonación y el uso de varetas solo de árboles sanos, vigorosos y libres de problemas fitosanitarios que aseguren mayor probabilidad de éxito del injerto (Cob Uicab et al., 2022).



Figure 2. Six months-old *Cedrela odorata* crown grafts: a) clone CR-A, b) clone CR-B, c) clone CR-C, d) clone CR-E, e) scion-rootstock union, f) graft growth at three months, g) lateral buds and h) graft crown.

Figura 2. Injertos de corona de *Cedrela odorata* de seis meses de edad: a) clon CR-A, b) clon CR-B, c) clon CR-C, d) clon CR-E, e) unión de vareta y portainjerto, f) crecimiento del injerto a los tres meses, g) yemas laterales y h) copa del injerto.

of plasmodesmata (intercellular channels), which facilitate the continuous movement of carbohydrates from the scion to the rootstock, may have affected the grafts of clones with lower growth (Gautier et al., 2019; Pina et al., 2017). Likewise, differences among clones may exist in the rate at which auxins are transported to the rootstock, influencing cytokinin production in the roots and contributing to variation in the growth of grafted scions (Darikova et al., 2011).

During the first three months, the red cedar grafts generally showed limited growth, averaging 6.2 cm (Figure 2f); after this period, growth accelerated, reaching an average of 118.5 cm at six months, considering that the scions were 10 cm long at the time of grafting (Figure 1h). Barrera-Ramírez et al. (2021) reported that in the initial months after grafting, scion growth is temporarily halted and resumes once a functional connection between the graft components is established. Cob Uicab et al. (2023) reported a height increase of only 0.23 m in six-months-old crown grafts of red cedar, which they attributed to a fragile union and lower graft vigor. In the present study, the four clones showed higher growth (0.85 to 1.43 m); however, it should be noted that factors beyond clone identity likely influenced growth differences among studies, including substrate, bag size, fertilization and irrigation of rootstocks before and after grafting, as well as environmental conditions and the timing of grafting.

Information on the initial growth of red cedar grafts is limited; typically, dendrometric and morphological traits are evaluated only after several years in clonal banks to guide breeding strategies and the selection of superior clones (Olvera-Moreno et al., 2022; Sampayo-Maldonado et al., 2019). In general, the positive height growth response observed for the four clones in this study can be attributed to the timing of grafting (March), which coincides with the onset of vegetative growth in this species and the elongation of shoots (Cob Uicab et al., 2022). After successful grafting, the scions resumed growth and continued their phenological development until the onset of winter, when leaf drop occurs and growth is restricted as the meristems enter a temporary dormancy (Viveros-Viveros & Vargas-Hernández, 2007). In broadleaf species, grafting is recommended at the beginning of the active growth phase, when mitotic activity in the meristem is highest (Cob Uicab et al., 2023). Moreover, the quality of the ortets may have influenced the favorable growth performance of the grafts, as the scions were obtained from trees showing the best phenotypic characteristics within the provenance trial. In this context, it would be valuable to conduct a physiological evaluation considering environmental factors to obtain more detailed information on the selected trees; for example, measuring photosynthetic rate, transpiration, nutrient status, and phytohormone levels.

Crecimiento del injerto

A los seis meses después del injertado, el clon CR-B presentó el mayor crecimiento en altura con cerca de 1.5 m y fue 57, 21 y 19 cm superior que los clones CR-E, CR-A y CR-C, respectivamente (Cuadro 2; Figura 2a-d). El diámetro del injerto no presentó diferencias entre clones y varió de 12.5 a 13.5 mm. Además de las características particulares de crecimiento que tiene cada árbol por su constitución genética, quizá las varetas del clon CR-B tuvieron mayor eficiencia en el uso del agua y nutrimentos (Barrera-Ramírez et al., 2024), la cual se expresó en mayor crecimiento en comparación con el clon CR-E. Por otra parte, la posible formación deficiente de plasmodesmos (canales intercelulares), para facilitar el movimiento continuo de carbohidratos producidos por la varetta hacia el portainjerto, pudo afectar los injertos de los clones con menor crecimiento (Gautier et al., 2019; Pina et al., 2017). Asimismo, puede haber diferencias entre clones con relación a la velocidad en la que se transportan las auxinas hacia el portainjerto, lo que afecta la producción de citoquininas en las raíces y causa diferencia en el crecimiento de las varetas injertadas (Darikova et al., 2011).

En los primeros tres meses, los injertos de cedro rojo tuvieron, en general, un crecimiento limitado de 6.2 cm en promedio (Figura 2f); a partir de esta fecha, el crecimiento se aceleró hasta alcanzar en promedio 118.5 cm en seis meses, considerando que las varetas tenían 10 cm de longitud al injertarse (Figura 1h). Barrera-Ramírez et al. (2021) indicaron que en los primeros meses después del injertado se detiene el crecimiento de la varetta y se reinicia cuando se establece una conexión funcional entre las partes del injerto. Cob Uicab et al. (2023) han reportado el crecimiento en altura de apenas 0.23 m en injertos de corona en cedro rojo a los seis meses, lo cual atribuyeron a una unión frágil y menor vitalidad de los injertos. En el presente estudio, los cuatro clones tuvieron mayor crecimiento (0.85 a 1.43 m); sin embargo, se debe considerar que entre estos estudios existen factores diversos, además del clon, que probablemente influyeron en el crecimiento: sustrato, tamaño de bolsa, fertilización y riego de los portainjertos antes y después de injertarse, así como condiciones ambientales y época de injertado.

La información del crecimiento inicial en injertos de cedro rojo es limitada, generalmente, se evalúan las características dendrométricas y morfológicas después de varios años en bancos clonales para definir estrategias de mejoramiento y selección de clones superiores (Olvera-Moreno et al., 2022; Sampayo-Maldonado et al., 2019). En general, la respuesta positiva en el crecimiento en altura para los cuatro clones puede atribuirse a la época del año en la que se injertaron las varetas (marzo) que marca el inicio del crecimiento vegetativo en esta especie y se da el alargamiento de los brotes (Cob Uicab et al.,

Number of buds

Clone identity influenced variation in the number of buds. Differences were observed between grafts of clone CR-A and CR-C, which produced 30 and 28 buds, respectively, and grafts of CR-E, which produced an average of 21 buds; grafts of clone CR-B, however, did not differ significantly from the other clones (Table 2). Lateral buds formed on the main stem of the graft at the upper base of each leaf, so that the number of buds corresponds to the number of leaves. The lateral buds were dormant, with only 3 mm of protrusion (Figure 2g), due to apical dominance exerted by the terminal bud of red cedar, which produces high levels of auxins that inhibit the growth of axillary buds below it (Ning et al., 2013). Each lateral bud consists of a primary meristem, formed from a group of undifferentiated cells with high division potential capable of generating new cells for tissue formation (Hartmann et al., 2014).

The grafts in this study can be managed as mother plants in the nursery for subsequent propagation cycles. Therefore, the number of buds is useful for planning the amount of plant material available for a second grafting cycle, particularly when using the patch technique, in which only a single dormant axillary bud is grafted (Hartmann et al., 2014). Using this technique, Cob Uicab et al. (2023) achieved graft success of up to 90 %. Clones CR-A, CR-B and CR-C can provide a great number of shoots for a second grafting cycle. Furthermore, grafting individual buds allows for more efficient use of plant material when a clone is limited, as in the case of CR-C, which showed only 30 % grafting success and produced few shoots.

Crown diameter

The grafts of clone CR-B developed, on average, a crown diameter of 108 cm, which was significantly greater than that of grafts from clones CR-A, CR-E and CR-C, with diameters of 86, 85 and 82 cm, respectively (Table 2). In another experiment, this variable in six-month-old grafts of *C. odorata* ranged from 22 to 28 cm (Cob Uicab et al. 2023), a smaller diameter than that obtained in the present study; however, other experimental factors may have influenced these differences. It has been reported that crown diameter may vary according to provenance, age, and competition for light and space (Rodríguez-Laguna et al., 2009). Considering that the ortets were of the same age and that the grafts grew under homogeneous conditions and were evenly spaced, it can be inferred that the original provenance of the ortet may have influenced the variation in crown diameter among clones (Table 1). Flores Flores et al. (2014) indicated that provenance can generate differences in growth habit and morphology within a

2022). Después del prendimiento de los injertos, las varetas reiniciaron el crecimiento para continuar con su fenología hasta el inicio del invierno, cuando se defolian y restringen su desarrollo, al entrar sus meristemas en reposo temporal (Viveros-Viveros & Vargas-Hernández, 2007). En especies latifoliadas se sugiere hacer el injertado al inicio de la fase activa del crecimiento vegetal, cuando aumenta la actividad de las divisiones mitóticas del meristemo (Cob Uicab et al., 2023). Además, la calidad de los ortets pudo influir en el buen desempeño en el crecimiento de los injertos, ya que las varetas provienen de los árboles que presentaban mejores características fenotípicas dentro del ensayo de procedencias. En este sentido sería importante hacer una evaluación fisiológica con relación a los factores ambientales, que permita tener más información de los árboles seleccionados; por ejemplo, determinar la tasa fotosintética, transpiración, estado nutricional y niveles de fitohormonas.

Número de yemas

El clon tuvo efecto sobre la variación en el número de yemas. Las diferencias se detectaron entre los injertos del clon CR-A y CR-C que formaron 30 y 28 yemas, respectivamente, con los injertos del CR-E que formaron 21 en promedio; en cambio, los injertos del clon CR-B no presentaron diferencias respecto a los otros clones (Cuadro 2). Las yemas laterales se formaron sobre el tallo principal del injerto en la base superior de cada hoja; es decir, el número de yemas corresponde al número de hojas. Las yemas laterales estaban en dormancia con solo 3 mm de excrecencia (Figura 2g), debido al efecto de la dominancia apical que ejerce la yema terminal de cedro rojo, ya que produce niveles altos de auxinas que inhiben el crecimiento de las yemas axilares por debajo de ella (Ning et al., 2013). Cada una de las yemas laterales consiste en un meristemo primario, formado a partir de la agrupación de células indiferenciadas con capacidad elevada de división celular que pueden generar células nuevas para la formación de tejidos (Hartmann et al., 2014).

Los injertos de este estudio se pueden manejar como plantas madre en vivero para ciclos siguientes de propagación, por ello, el número de yemas ayuda en la planeación de la cantidad de material vegetal disponible en un segundo ciclo de injerto, particularmente con la técnica de parche, en la que se injerta solo una yema axilar en reposo (Hartmann et al., 2014) y con la cual Cob Uicab et al. (2023) lograron prendimiento de hasta 90 %. A partir de los clones CR-A, CR-B y CR-C se podrán obtener mayor número de rametos en un segundo ciclo de injerto. Además, al injertar yemas individuales, el uso del material vegetal se hace más eficiente cuando un clon es limitado, como el CR-C, que solo tuvo el 30 % de prendimiento y se tienen pocos rametos.

species, as a result of evolutionary adaptation to the specific conditions of its environment.

In a trial with *Pinus greggii* Engelm., provenance accounted for 7.5 % of the variation in crown projection area (Rodríguez-Laguna et al., 2009); however, the implications for leaf area, morphology, growth, biomass, and photosynthesis in grafted plants are poorly documented (Martínez-Ballesta et al., 2010). All four clones, six months after grafting, developed a functional shoot system, which is an indicator of the physiological reactivation of the scion and the viability of the connection between the graft components; that is, the rootstock is already capable of supplying the water and nutrients required by the scion (Hartmann et al., 2014). In addition, these organs will be responsible for carrying out photosynthesis, transpiration, and respiration, which are necessary for the growth and survival of the grafted plant (González-Jiménez et al., 2022).

Conclusions

Crown grafting clonal propagation of selected trees from the *Cedrela odorata* provenance trial was successful. Clone was an important source of variation in grafting success and initial growth response; on the one hand, clones CR-E and CR-B ensure a higher grafting success rate compared with the other selected clones, while on the other hand, clone CR-B stood out in most of the growth variables evaluated. Red cedar grafts are relevant for the conservation of selected clones and facilitate their continued multiplication through subsequent propagation cycles; however, the variation observed among clones implies the need for complementary studies on compatibility and the condition of the ortet to ensure a higher probability of success and great uniformity in *C. odorata* grafts.

Acknowledgments

The authors thank the Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza for providing facilities for the collection of scions from the provenance trial and for the establishment of the *Cedrela odorata* grafting experiment. They also thank the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) for the postdoctoral fellowship awarded to the corresponding author.

Conflict of interest declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest or known personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

End of English version

Diámetro de copa

Los injertos del clon CR-B desarrollaron, en promedio, un diámetro de copa de 108 cm, el cual fue significativamente mayor que los injertos de los clones CR-A, CR-E y CR-C con diámetros de 86, 85 y 82 cm, respectivamente (Cuadro 2). En otro experimento, esta variable en injertos de *C. odorata* de seis meses midió de 22 a 28 cm (Cob Uicab et al. 2023), diámetro menor que el obtenido en esta investigación; sin embargo, otros factores experimentales pudieron haber influido en las diferencias. Se ha reportado que el diámetro de copa puede variar según la procedencia, edad y competencia por luz y espacio (Rodríguez-Laguna et al., 2009). Si se considera que los ortets tenían la misma edad y que los injertos crecieron en condiciones homogéneas distribuidos de forma equidistante, se deduce que la procedencia original del ortet pudo haber influido en la variación del diámetro de copa entre clones (Cuadro 1). Flores Flores et al. (2014) mencionan que la procedencia podría generar diferencias en el hábito de crecimiento y morfología de una especie, adaptada evolutivamente a las condiciones particulares de su entorno.

En un ensayo con *Pinus greggii* Engelm., la procedencia aportó 7.5 % de la variación en el área de proyección de copa (Rodríguez-Laguna et al., 2009); sin embargo, las implicaciones sobre el área foliar, morfología, crecimiento, biomasa y fotosíntesis en plantas injertadas están poco documentadas (Martínez-Ballesta et al., 2010). Los cuatro clones, a los seis meses de haberse injertado, generaron una parte aérea funcional, lo que es un indicador de la reactivación fisiológica de la varetta y viabilidad en la conexión entre las partes del injerto; es decir, el portainjerto ya es capaz de suministrar el agua y los nutrimentos que la varetta requiere (Hartmann et al., 2014). Además, estos órganos serán los encargados de llevar a cabo la fotosíntesis, transpiración y respiración, necesarios para el crecimiento y supervivencia de la planta injertada (González-Jiménez et al., 2022).

Conclusiones

La clonación por injerto de corona de los árboles seleccionados del ensayo de procedencias de *Cedrela odorata* fue satisfactoria. El clon es un factor de variación importante en la respuesta al prendimiento y crecimiento inicial del injerto; por un lado, los clones CR-E y CR-B aseguran mayor porcentaje de prendimiento respecto al resto de los clones seleccionados, por el otro, el clon CR-B destaca en la mayoría de las variables de crecimiento evaluadas. Los injertos de cedro rojo son relevantes para la conservación de los clones seleccionados y facilitan su continua multiplicación mediante ciclos de propagación subsecuentes; sin embargo, la variación

References / Referencias

- Álvarez López, H. (2019). *Manual de injertación en frutales, contribución en fisiología vegetal*. Universidad Nacional de Jaén. <https://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/389/1/MANUAL%20DE%20INJERTACION.pdf>
- Barrera-Ramírez, R., Vargas-Hernández, J. J., Gómez-Cárdenas, M., Treviño-Garza, E. J., & Pérez-Luna, A. (2024). Interaction and compatibility in reciprocal grafting with two varieties of *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 30(1), 1-6. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.10.079>
- Barrera-Ramírez, R., Vargas-Hernández, J. J., López-Aguillón, R., Muñoz-Flores, H. J., Treviño-Garza, E. J., & Aguirre-Calderón, O. A. (2021). Impact of external and internal factors on successful grafting of *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) Harrison. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(2), 243-256. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.05.037>
- Castro-Garibay, S. L., Villegas-Monter, A., & López-Upton, J. (2017). Anatomy of rootstocks and scions in four pine species. *Forest Research*, 6(3), 1-6. <https://doi.org/10.4172/2168-9776.1000211>
- Cob Uicab, J. V., Rodríguez Santiago, B., & García Cuevas, X. (2023). Estandarización de un método de propagación asexual para el establecimiento de un banco clonal de *Cedrela odorata* L. *South Florida Journal of Development*, Miami, 4(6), 2288-2296. <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n6-006>
- Cob Uicab, J. V., Santiago Trinidad, O., & Reynoso Santos, R. (2022). *Manual técnico de producción de injertos de cedro rojo (Cedrela odorata L.)*. CONAFOR. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/manual-tecnico-de-produccion-de-injertos-de-cedro>
- Cibrián Tovar, D. (2016). *Manual para la identificación y manejo de plagas en plantaciones forestales comerciales*. CONAFOR. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Manuales-Tecnicos/Manual_para_la_identificacion_y_manejo_de_plagas_en_plantaciones_forestales.pdf
- Darikova, J. A., Savva, Y. V., Vaganov, E. A., Grachev, A. M., & Kuznetsova, G. V. (2011). Grafts of woody plants and the problem of incompatibility between scion and rootstock (a review). *Journal of Siberian Federal University (Biology)*, 1(4), 54-63. <https://journal.sfu-kras.ru/en/article/2376>
- Flores Flores, C., López Upton, J., & Valencia Manzo, S. (2014). *Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies*. CONAFOR. <https://conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/19/0Manual%20Te%CC%81cnico%20para%20e1%20Establecimiento%20de%20Ensayos.pdf>
- Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Rojas-Vargas, M., & Spínola Parallada, R. M. (2021). Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Tropical Journal of Environmental Sciences*, 55(1), 143-159. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.7>
- Gálvez López, L., Vallejo Reyna, M. Á., Méndez Espinoza, C., & López Upton, J. (2020). *Cedrela odorata* L.: oportunidades para su conservación y mejoramiento genético. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(58), 4-25. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.622>
- 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>
- González-Jiménez, B., Jiménez-Casas, M., López-Upton, J., López-López, M. Á., & Rodríguez-Laguna, R. (2022). Combination of grafting techniques to clone superior genotypes of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Agrociencia*, 56(5), 993-1017. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i5.2582>
- González-Jiménez, B., Jiménez-Casas, M., López-Upton, J., López-López, M. Á., & Rodríguez-Laguna, R. (2023). Scion and rootstock compatibility in *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in response to genotypic variation. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(1), 147-161. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.08.061>
- Hartmann, T. H., Kester, E. D., Davies Jr., T. F., & Geneve, L. R. (2014). *Plant propagation principles and practices* (8th ed.). Pearson.
- Hernández Ramos, J., Reynoso Santos, R., Hernández Ramos, A., García Cuevas, X., Hernández-Máximo, E., Cob Uicab Uicab, J. V., & Sumano López, D. (2018). Distribución histórica, actual y futura de *Cedrela odorata* en México. *Acta Botánica Mexicana*, 124, 117-134. <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1305>
- Honorato Salazar, J. A., & Sánchez Monsalvo, V. (2018). Variabilidad de la densidad básica de la madera de diez clones sobresalientes de cedro rojo *Cedrela odorata* L. In J. Martínez Herrera, M. A. Ramírez Guillermo, & J. Cámara-Córdova (Eds.), *Investigaciones científicas y agrotecnológicas para la seguridad alimentaria* (pp. 221-225). INIFAP. <https://archivos.ujat.mx/2019/div-daca/publicacion/ICASegAlim.pdf>
- Instituto Nacional de Bosques (INAB). (2019). *Paquete tecnológico forestal, cedro, Cedrela odorata L.* INAB. http://mangomaps.inab.gob.gt/PTF_Cedrella_odorata_L.pdf
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2023). *Plantaciones forestales con cedro rojo en el trópico*

Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza por las facilidades para la colecta de las varetas del ensayo de procedencias y establecimiento del experimento de injertos de *Cedrela odorata*. A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de posdoctorado otorgada al autor de correspondencia.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.

Fin de la versión en español

union formation and scion-rootstock interactions. *Journal of Experimental Botany*, 70(3), 747-755. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery422>

González-Jiménez, B., Jiménez-Casas, M., López-Upton, J., López-López, M. Á., & Rodríguez-Laguna, R. (2022). Combination of grafting techniques to clone superior genotypes of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Agrociencia*, 56(5), 993-1017. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i5.2582>

González-Jiménez, B., Jiménez-Casas, M., López-Upton, J., López-López, M. Á., & Rodríguez-Laguna, R. (2023). Scion and rootstock compatibility in *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in response to genotypic variation. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(1), 147-161. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.08.061>

Hartmann, T. H., Kester, E. D., Davies Jr., T. F., & Geneve, L. R. (2014). *Plant propagation principles and practices* (8th ed.). Pearson.

Hernández Ramos, J., Reynoso Santos, R., Hernández Ramos, A., García Cuevas, X., Hernández-Máximo, E., Cob Uicab Uicab, J. V., & Sumano López, D. (2018). Distribución histórica, actual y futura de *Cedrela odorata* en México. *Acta Botánica Mexicana*, 124, 117-134. <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1305>

Honorato Salazar, J. A., & Sánchez Monsalvo, V. (2018). Variabilidad de la densidad básica de la madera de diez clones sobresalientes de cedro rojo *Cedrela odorata* L. In J. Martínez Herrera, M. A. Ramírez Guillermo, & J. Cámara-Córdova (Eds.), *Investigaciones científicas y agrotecnológicas para la seguridad alimentaria* (pp. 221-225). INIFAP. <https://archivos.ujat.mx/2019/div-daca/publicacion/ICASegAlim.pdf>

Instituto Nacional de Bosques (INAB). (2019). *Paquete tecnológico forestal, cedro, Cedrela odorata L.* INAB. http://mangomaps.inab.gob.gt/PTF_Cedrella_odorata_L.pdf

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2023). *Plantaciones forestales con cedro rojo en el trópico*

- mexicano. <https://www.gob.mx/inifap/articulos/plantaciones-forestales-con-cedro-rojo-en-el-tropico-mexicano>
- Kulac, S., & Özkuru, Y. (2021). Reproduction of some newly identified chestnut genotypes by different grafting methods from west Anatolia. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 21(3), 218-228. <https://doi.10.17475/kastorman.1049317>
- Martínez-Ballesta, M. C., Alcaraz-López, C., Muries, B., Mota-Cadenas, C., & Carvajal, M. (2010). Physiological aspects of rootstock-scion interactions. *Scientia Horticulturae*, 127(2), 112-118. <https://doi.10.1016/j.scienta.2010.08.002>
- Ning, D. L., Lu, T. C., Liu, G. F., Yang, C. P., & Wang, B. C. (2013). Proteomic analysis points to a role for RAD23 in apical dominance in *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Plant Molecular Biology Reporter*, 31, 1283-1292. <https://doi.org/10.1007/s11105-013-0593-0>
- Olvera-Moreno, S., López-Upton, J., Sánchez-Monsalvo, V., & Jiménez-Casas, M. (2022). Parámetros genéticos e interacción genotipo-ambiente en ensayos clonales de *Cedrela odorata* L. *Madera y Bosques*, 28(1), e2812318. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812318>
- Paul, C., & Weber, M. (2013). Intercropping *Cedrela odorata* with shrubby crop species to reduce infestation with *Hypsipyla grandella* and improve the quality of timber. *International Scholarly Research Notices*, 637410. <https://doi.org/10.1155/2013/637410>
- Pina, A., Cookson, S. J., Calatayud, A., Trinchera, A., & Errea, P. (2017). Physiological and molecular mechanisms underlying graft compatibility. In G. Colla, F. Pérez-Alfocea, & D. Schwarz (Eds.), *Vegetable grafting: principles and practices* (pp. 132-154). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780648972.0000>
- Puc-Kauil, R., Nava-Nava, A., Paredes-Díaz, E., Ruiz-Aquino, F., Gerónimo-Torres, J., & Ortiz, J. (2024). Funciones alométricas de altura total para pinos tropicales en Puebla, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2), e4118. <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.4118>
- Rodríguez-Laguna, R., Meza-Rangel, J., Vargas-Hernández, J., & Jiménez-Pérez, J. (2009). Variación en la cobertura de suelo en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León. *Madera y Bosques*, 15(1), 47-59. <https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/1196>
- Sampayo-Maldonado, S., Castillo-Martínez, C. R., Jasso-Mata, J., Jiménez-Casas, M., López-Upton, J., & Sánchez-Monsalvo, V. (2016). Efecto del medio de cultivo en la propagación *in vitro* de genotipos de *Cedrela odorata* L. *Agro Productividad*, 9(2), 62-69. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/722/591>
- Sampayo-Maldonado, S., López-Upton, J., Sánchez-Monsalvo, V., & Jiménez-Casas, M. (2019). Genetic parameters of growth, and resistance to the shoot borer, in young clones of the tree *Cedrela odorata* (Meliaceae). *Revista de Biología Tropical*, 67(3), 554-561. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i3.32053>
- SAS Institute, Inc. (2013). *User's guide* (ver. 9.4) [software]. https://documentation.sas.com/doc/en/pgmsascdc/9.4_3.5/connref/titlepage.htm
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. DOF. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2024). *Información estadística climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales5110/NORMAL21142.TXT>
- Viveros-Viveros, H., & Vargas-Hernández, J. J. (2007). Dormancia en yemas de especies forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(2), 131-135. <https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues&numero=36&articulo=478>
- Warschefsky, J. E., Klein, L. L., Frank, H. M., Chitwood, H. D., Londo, P. J., von Wettberg, J. B. E., & Miller, J. A. (2016). Rootstocks: diversity, domestication, and impacts on shoot phenotypes. *Trends in Plant Science*, 21(5), 418-437. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.11.008>