



Eficiencia del acodo aéreo en tres taxones de pinos tropicales con diferentes concentraciones de auxina

Efficiency of air layering in three tropical pine taxa with different auxin concentrations

Ester Paredes Díaz¹, Benito González Jiménez^{2*}, Alberto Pérez Luna², Marcos Jiménez Casas², Norberto Silva Pérez²

Fecha de recepción/Reception date: 22 de septiembre de 2025
Fecha de aceptación/Acceptance date: 27 de noviembre de 2025

¹Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, México.

²Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, México.

*Autor para correspondencia; correo-e: gonzalezforestal49@gmail.com

*Corresponding author; e-mail: gonzalezforestal49@gmail.com

Resumen

El acodo aéreo es una herramienta efectiva para clonar árboles adultos de difícil propagación, pero no siempre se logra generar raíces; por ello es necesario aplicar hormonas de forma exógena y definir su dosis. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la concentración del ácido Indol-3-butírico (AIB) en el enraizamiento de acodos en tres taxones de pinos tropicales. Se seleccionaron 20 árboles en un ensayo de procedencias y el experimento se estableció en un diseño completamente al azar y los tratamientos en arreglo factorial: (1) factor taxón: *Pinus caribaea* y los híbridos *P. caribaea* × *P. tecunumanii* y *P. elliottii* × *P. caribaea*; (2) factor concentración de AIB: 10, 20, 30 y 40 g kg⁻¹ de sustrato. En los tres taxones se evaluó la supervivencia (%), el enraizamiento (%), el crecimiento de la yema (cm) y el número de raíces. Los datos se analizaron mediante Transformaciones de Rangos Alienados. Los dos factores y su interacción no presentaron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) para ninguna variable. La supervivencia de la rama acodada en los tres taxa fue >50 %. El valor máximo de enraizamiento y el número de raíces generadas se registró en *P. caribaea* (31.25 % y 0.78) y *P. caribaea* × *P. tecunumanii* (28.57 % y 1.17). Las concentraciones de AIB de 10, 20, 30 y 40 g kg⁻¹ promovieron 35, 25, 15 y 25 % de enraizamiento del acodo. Se logró la propagación en todos los taxones probados, pero se requieren otras concentraciones de auxina que aumenten el éxito de los acodos.

Palabras clave: Auxina, enraizamiento adventicio, híbrido, *Pinus caribaea* Morelet, *Pinus caribaea* × *Pinus tecunumanii*, *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*.

Abstract

Air layering is an effective tool for cloning adult trees that are difficult to propagate, but roots are not always successfully generated; therefore, it is necessary to apply hormones exogenously and define their dosage. The objective of this study was to evaluate the effect of Indole-3-butyric acid (IBA) concentration on the rooting of layers in three taxa of tropical pines. Twenty trees were selected in a provenance trial, and the experiment was established in a completely randomized design with treatments arranged factorially: (1) taxon factor: *Pinus caribaea* and the hybrids *P. caribaea* × *P. tecunumanii* and *P. elliottii* × *P. caribaea*; (2) IBA concentration factor: 10, 20, 30, and 40 g kg⁻¹ of substrate. Survival (%), rooting (%), bud growth (cm), and root number were evaluated in the three taxa. The data were analyzed using Aligned Ranks Transformations. The two factors and their interaction showed no statistical differences ($p < 0.05$) for any variable. The survival of the layered branch in the three taxa was >50%. The maximum rooting value and the number of roots generated were recorded in *P. caribaea* (31.25% and 0.78) and *P. caribaea* × *P. tecunumanii* (28.57% and 1.17). IBA concentrations of 10, 20, 30, and 40 g kg⁻¹ promoted 35, 25, 15, and 25% rooting of the layer. Propagation was achieved in all tested taxa, but other auxin concentrations are needed to increase the success of the layers.

Keywords: Auxin, adventitious rooting, hybrid, *Pinus caribaea* Morelet, *Pinus caribaea* × *Pinus tecunumanii*, *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*.

Introducción

El género *Pinus* L., con cerca de 120 especies, se ha adaptado a diversos ambientes (Gernhardt & Pérez-de la Rosa, 2014). *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl.) W. H. Barrett & Golfari es una conífera tropical de interés mundial por su rápido crecimiento y rectitud del fuste; alcanza alturas de 6 a 8 m en tres años y se utiliza para producir madera, papel y resina (Asociación Mexicana de Plantadores Forestales A. C. [Ameplanfor A. C.], 2016; Torres-Ávila et al., 2020). *P. caribaea* Morelet puede hibridar mediante el intercambio genético con otras especies de pino (Central America and Mexico Coniferous Resources Cooperative [Camcore], 2009). El híbrido *P. elliottii* var. *elliottii* × *P. caribaea* var. *hondurensis* se estableció en 1955 en Australia y posee características favorables que han superado a sus especies parentales en crecimiento, forma y resistencia al viento (Nunes et al., 2018).

En México se han plantado miles de hectáreas de este híbrido para la producción de madera y resina (Cabrera-Ramírez et al., 2022). *Pinus caribaea* también puede hibridar con *Pinus tecunumanii* F. Schwerdtf. ex Eguiluz & J. P. Perry, lo que genera

individuos con mejor forma y crecimiento rápido, además su productividad se incrementa al plantarse en nichos ecológicos correctos (Ameplanfor A. C., 2016).

En el país, existen ensayos de procedencias con especies de pinos tropicales para seleccionar aquellas que mejor se adapten y establecer plantaciones con el fin de extraer resina y comercializar la madera (Puc-Kauil et al., 2024; Torres-Ávila et al., 2020). Debido a la importancia de este grupo de pinos de rápido crecimiento, se deben explorar protocolos de clonación de árboles fenotípicamente sobresalientes que permitan su conservación y multiplicación. Aunque existen diversas técnicas de propagación vegetativa, se requiere seleccionar la más favorable para cada especie y propósito (Hartmann et al., 2014).

El enraizamiento de estacas no es factible en árboles de pino mayores de dos años, porque disminuye la capacidad de enraizamiento adventicio, debido a su madurez fisiológica y especialización celular (Bautista-Ojeda et al., 2022); mientras que la aplicación de las técnicas de injertado se dificulta, principalmente por la falta de portainjertos de especies de pinos tropicales y a la limitada información sobre compatibilidad de injertos interespecíficos. Por lo tanto, el acodo es una alternativa inicial viable para conservar y multiplicar, a menor escala, árboles de interés de taxa del género *Pinus* mayores de 5 años y obtener clones adaptados a la región de los donantes (Vacek et al., 2012). Sin embargo, la eficacia de esta técnica varía con la especie (Stuepp et al., 2018), como lo describieron Singh y Ansari (2014) para cinco taxones tropicales.

El acodo aéreo consiste en inducir raíces adventicias en ramas mientras aún están unidas a la planta madre; una vez que enraíza, se corta del árbol y se pone en sustrato para continuar su crecimiento como una planta independiente (Hartmann et al., 2014). El éxito depende de varios factores como tipo y concentración de auxina, especie, estados fisiológico y hormonal, edad del árbol, lugar de anillado, posición de la rama en el árbol, factores ambientales, fecha de ejecución y el sustrato (Kamila & Panda, 2019).

La aplicación exógena de ácido Indol-3- Butírico (AIB) al acodo favorece la inducción y acelera la tasa de enraizamiento adventicio en muchas especies, además incrementa el número de raíces (Noori et al., 2019). En acodos de *Syzygium samarangense* (Blume) Merr. & L. M. Perry y *Psidium guajava* L., la concentración alta de AIB favoreció el enraizamiento (Baghel et al., 2016; Khandaker et al., 2022); en *Prosopis chilensis* (Molina) Stuntz y *Prunus lusitanica* subsp. *azorica* (Mouill.) Franco, se tuvo mejor respuesta con dosis bajas de auxina (Moreira et al., 2009; Tarnowski, 2021); en *Brosimum alicastrum* Sw. y *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. fue indistinto (Becerra & Plancarte, 1993; Ortigoza-García et al., 2025). En este contexto, es importante evaluar la concentración de auxina que garantice la mayor probabilidad de enraizamiento del acodo en especies de pinos tropicales.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta en el enraizamiento, la supervivencia, el número de raíces y el crecimiento de la yema de acodos aéreos por efecto de la concentración de AIB, el taxón y su interacción. Bajo la hipótesis de que determinada concentración de AIB generará mejor respuesta del acodo, así como los taxones responden de forma diferente en las variables evaluadas, debido a que puede haber una concentración óptima de AIB para cada taxón que favorezca el desempeño del acodo en el enraizamiento.

Materiales y Métodos

Ensayo de procedencias

Los acodos se realizaron en árboles de un ensayo de ocho procedencias de dos especies puras de pinos tropicales y dos híbridos: (1) *P. caribaea* de dos procedencias (Australia y Venezuela), (2) *P. elliottii* Engelm. (Argentina), (3) el híbrido *P. elliottii*

var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis* de cuatro procedencias (Australia, China y dos de Argentina) y (4) el híbrido de *P. caribaea* var. *hondurensis* x *P. tecunumanii* (Australia). El ensayo se estableció en 2016 en el Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza (ITSVC), municipio Venustiano Carranza, estado de Puebla ($20^{\circ}28'19.6''$ N y $97^{\circ}41'56.4''$ O), a 340 m de altitud, con un diseño en seis bloques completos al azar y en cada uno de ellos 49 árboles (7x7) por procedencia. La plantación se distribuyó en 1.7 ha, con distanciamiento entre plantas de 3.5×2.3 m. El clima es cálido húmedo (Cw) con temperatura media anual de 24 °C y precipitación de 1 450 mm (Puc-Kauil et al., 2024; Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2024).

Selección de árboles

En octubre de 2023 se evaluó el diámetro normal (*DN*; cm) con cinta diamétrica (*Forestry Supplier®* 283D/5m), altura total (*AT*; m) y altura de fuste limpio (*AFL*; m) con clinómetro electrónico (*Haglöf® HEC-MP*, Suecia). Con esa información se seleccionaron 20 árboles sobresalientes en estas dos variables: ocho de *P. caribaea*, cinco de *P. elliottii* x *P. caribaea* y siete de *P. caribaea* x *P. tecunumanii* (Cuadro 1). *P. elliottii* se descartó del estudio de acodos, ya que presentó el menor crecimiento en el ensayo (Puc-Kauil et al., 2024).

Cuadro 1. Características (\pm error estándar) de los árboles de ocho años de los taxones de pinos tropicales seleccionados para realizar acodos aéreos.

Taxón	AT (m)	DN (cm)	AFL (m)
<i>Pinus caribaea</i> Morelet	11.0 ± 0.5	17.1 ± 1.1	2.3 ± 0.1
<i>Pinus elliottii</i> x <i>Pinus caribaea</i>	9.1 ± 0.9	17.1 ± 0.6	2.3 ± 0.1
<i>Pinus caribaea</i> x <i>Pinus tecunumanii</i>	13.0 ± 0.3	18.9 ± 0.9	3.4 ± 0.3

AT = Altura total; DN = Diámetro normal a 1.30 m; AFL = Altura de fuste limpio.

Preparación de sustrato

Se prepararon cuatro tratamientos mediante la mezcla de 4 kg de turba de musgo o *peat moss* (*Kekkilä Profesional®*, Finlandia) con diferente cantidad de AIB en polvo (*Radix 10,000®*, México): 10, 20, 30 y 40 g kg⁻¹ de sustrato; cada mezcla se revolvió y se humedeció con 4 L de agua pura hasta obtener mezclas homogéneas. Después, se depositaron 150 g de sustrato en 20 bolsas transparentes de polietileno de 8×15 cm por tratamiento, se marcaron con un color distintivo y se amarraron con rafia para evitar la pérdida de humedad (Figura 1A). La mezcla del AIB en el sustrato y su embolsado previo fue una variación del acodo aéreo, generalmente utilizado con el fin de mantener a la auxina en contacto con el área de anillado durante todo el proceso de enraizamiento y facilitar su ejecución en la copa de los árboles.



A = Sustrato de *peat moss* con diferentes concentraciones de AIB; B = Ascenso al árbol; C = Anillado de rama; D = Colocación de bolsa con sustrato; E = Acodo aéreo; F = Separación de acodo de la planta madre; G = Trasplante del acodo.

Figura 1. Proceso de acodo aéreo de pinos tropicales.

Acodo aéreo

En noviembre de 2023, los acodos se hicieron en las ramas del tercio superior de la copa de los árboles (Figura 1B), a 40 cm de la punta de la rama hacia el fuste. Las ramas para acodar tuvieron en promedio 4 cm de diámetro en la base y 1.4 ± 0.08 cm en el punto donde se realizó el anillado. Con una navaja se efectuó un corte en forma de anillo de 2 cm de ancho para desprender la corteza y dejar expuesto el xilema (Figura 1C). Las bolsas con sustrato se abrieron en la parte media y se colocaron de tal manera que el sustrato cubriera por completo el sitio anillado; finalmente, se amarró con rafia para evitar la pérdida de humedad (Figura 1D y 1E). En cada árbol se hicieron cuatro acodos (uno por tratamiento de AIB), todos a la misma altura.

Separación del acodo de la planta madre

A los tres meses, los acodos se cortaron con un serrucho curvo, a 5 cm del acodo, con el fin de separarlos de la planta madre (Figura 1F); después, los acodos se bajaron con una cuerda y se etiquetaron para llevarlos al vivero del ITSVC, ubicado a 120 m. Los acodos se sumergieron en agua por 24 horas para su rehidratación; al día siguiente se quitó la bolsa que los cubría y se evaluó el enraizamiento. El acodo se trasplantó a una bolsa de polietileno negra de 4 L, que se llenó con sustrato hasta cubrir el cuello del acodo (Figura 1G). El sustrato estuvo integrado por perlita (10 %), materia orgánica a partir del mantillo formado en el horizonte superior (60 %) y tierra del horizonte "A" (30 %), ambas del suelo de la vegetación de la región. Los acodos embolsados se acomodaron en un vivero con malla sombra de 70 % de retención de luz y se regaron cada tercer día durante un mes, para su aclimatación.

Diseño experimental

El ensayo se estableció bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial (3×4). Se probaron dos factores: (1) taxón (*P. caribaea*, *P. elliottii* × *P. caribaea* y *P. caribaea* × *P. tecunumanii*), y (2) concentración de AIB (10, 20, 30 y 40 g kg⁻¹ de sustrato); en total 12 tratamientos, con ocho repeticiones para *P. caribaea*, cinco para *P. elliottii* × *P. caribaea* y siete para *P. caribaea* × *P. tecunumanii*.

En cada acodo se evaluó: (1) la supervivencia, como vivo (1) o muerto (0) sin importar la presencia de raíces. (2) Enraizamiento, como enraizado (1) y no enraizado (0); se consideraron enraizados aquellos que generaron raíces mayores a 2 cm y los no enraizados, sin el desarrollo de las mismas, ni reparar en su estatus de supervivencia. Posteriormente, se obtuvo el porcentaje de la supervivencia y de acodos enraizados. (3) Crecimiento de la yema terminal (cm), que se midió con un flexómetro (*Truper® FH-3M*, México) a partir de los 40 cm que tenían al momento de acodar. (4) Número de raíces, que se determinaron por el conteo directo antes de trasplantar el acodo a la bolsa. Las variables se evaluaron al momento de separar los acodos de las plantas madre.

Se realizaron las pruebas de *Shapiro-Wilk* y *Kolmogorov-Smirnov* para comprobar la distribución de los residuales. Las variables supervivencia y enraizamiento se transformaron con la función arco seno para reducir el efecto de las observaciones extremas (Burbidge et al., 1988). Al rechazarse el supuesto de distribución normal para todas las variables, se optó por el análisis de varianza de Transformaciones de Rangos Alineados (ART), así como la prueba de comparaciones múltiples entre niveles de factores con la estructura del ART, para determinar el efecto del taxón, la concentración de AIB y su interacción sobre las variables respuesta (Saste et al., 2016). Los análisis se realizaron en el paquete estadístico *R®* versión 3.5.3 con las librerías *agricolae* y *ARTool* de *R®* (R Core Team, 2020). Se consideró el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + A_j + TA_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Valor de la variable respuesta correspondiente al i -ésimo nivel de T ($i=P. caribaea, P. elliottii \times P. caribaea$ y $P. caribaea \times P. tecunumanii$), j -ésimo nivel de A ($j=10, 20, 30$ y 40 g kg^{-1} de AIB en el sustrato) y $k=1, 2, 3, \dots$ repeticiones

μ = Media general

T_i = Efecto del taxón

A_j = Efecto de la concentración de auxina AIB

TA_{ij} = Efecto de la interacción taxón-concentración de AIB

ϵ_{ijk} = Error experimental

Resultados y Discusión

Enraizamiento y supervivencia de los acodos

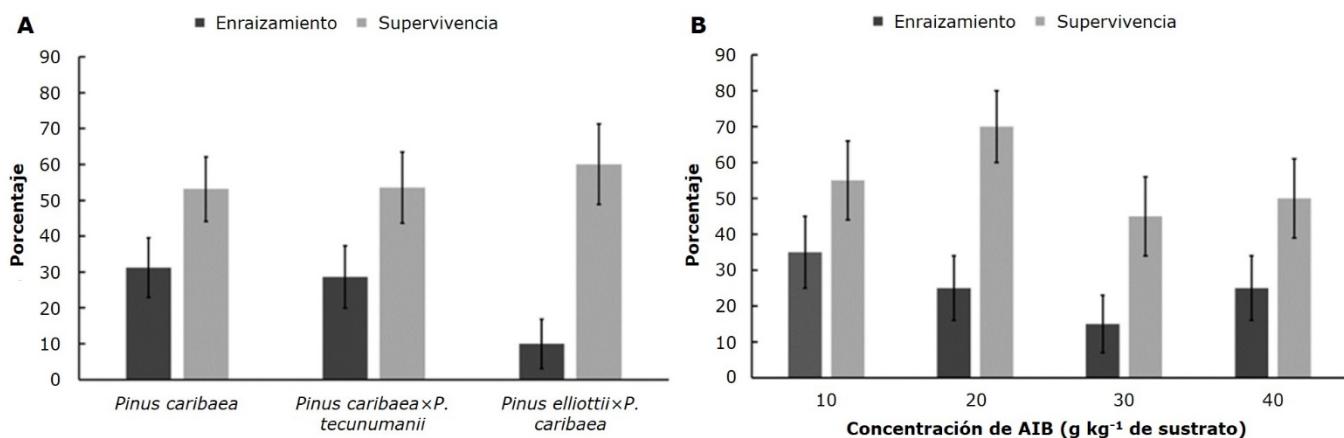
No hubo diferencias estadísticas ($P>0.05$) en el enraizamiento y la supervivencia por efecto del taxón, la dosis de auxina, ni la interacción entre estos factores (Cuadro 2). La respuesta similar de los acodos en los tres taxones pudiera relacionarse a su cercanía taxonómica, ya que *P. caribaea* y las dos especies con las que hibridó están agrupadas en la misma subsección y se espera que hayan evolucionado de forma semejante (Gernandt et al., 2005).

Cuadro 2. Resultados del análisis de la Transformación de Rangos Alineados en el enraizamiento y supervivencia de acodos en pinos tropicales.

Factor	GL	Cuadrado de la media	Valor de F	P>F
Enraizamiento				
Taxón	2	597.6	1.71	0.17
Concentración de AIB (g kg ⁻¹)	3	815.4	1.12	0.33
Taxón×Concentración de AIB	6	389.36	0.73	0.62
Supervivencia				
Taxón	2	10.2	0.02	0.98
Concentración de AIB (g kg ⁻¹)	3	712.8	1.24	0.30
Taxón×Concentración de AIB	6	172.6	0.30	0.93

GL = Grados de libertad; AIB = Ácido indol-3-butírico.

El máximo enraizamiento se verificó en *P. caribaea* (31.25 %), seguido del híbrido *P. caribaea* × *P. tecunumanii* (28.57 %), mientras que *P. elliottii* × *P. caribaea* solo alcanzó 10 % (Figura 2A). Los dos taxones con mayor enraizamiento también mostraron mejor desempeño en el crecimiento en altura y diámetro en el ensayo de procedencias (Puc-Kauil et al., 2024), lo que puede indicar que han tenido mejor adaptación a las condiciones de la región, y favoreció el enraizamiento del acodo. Al respecto, los árboles más vigorosos generan mayores recursos metabólicos que benefician el enraizamiento adventicio, por la acumulación de carbohidratos en el área cercana al anillado (Amissah & Bassuk, 2004). Sin embargo, además de la eficiencia en la producción de fotosintatos, es importante considerar la cantidad de auxinas endógenas de los árboles al momento de acodar y que varían de acuerdo con la fisiología de cada especie (Uribe et al., 2008).



A = Factor taxón; B = Factor concentración de AIB. Barras de error expresan el error estándar.

Figura 2. Porcentaje de enraizamiento y supervivencia de acodos aéreos en pinos tropicales.

El éxito del acodo puede ser diferente entre especies de un mismo género, los acodos de *Quercus bicolor* Willd. enraizaron 65 % y en *Q. microphylla* Née., 50 % (Amissah & Bassuk, 2004). Incluso la respuesta al enraizamiento del acodo varía entre variedades de una misma especie, como Afzal et al. (2017) describieron para *Olea europaea* L.

Algunos grupos de especies tienen mejor respuesta al enraizamiento del acodo que otras; por ejemplo, en taxa de mangle como *Laguncularia racemosa* (L.) C. F. Gaertn. y *Conocarpus erectus* L., han llegado hasta 90 % (Benítez-Pardo et al., 2002); en frutales, como *Psidium guajava* L., cerca de 60 % (Baghel et al., 2016); mientras que, en coníferas, ha sido menor la respuesta, como en *Pinus greggii* con 20-40 % (Becerra & Plancarte, 1993).

La respuesta del enraizamiento de *P. caribaea* y el híbrido *P. caribaea* × *P. tecunumanii* se considera importante, dada la dificultad de los individuos adultos del género *Pinus* para desarrollar raíces adventicias. Además, mediante esta técnica se

logró obtener clones de los mejores árboles del ensayo de procedencias adaptados a la región y con un sistema funcional de raíces.

La supervivencia de la rama acodada no presentó diferencias estadísticas y varió de 50 a 60 % (Figura 2A), lo cual advierte que posiblemente son los mismos factores los que causaron la muerte de todos los taxones probados. Esto sugiere que la aplicación de la técnica de acodo puede afectar de manera negativa la supervivencia de algunas ramas acodadas.

En otro estudio con cinco especies de árboles tropicales, la supervivencia de la rama acodada fue de 60 % (Singh & Ansari, 2014), lo cual fue similar al resultado de este estudio. Aunque se espera que la rama acodada se mantenga viva y continúe el flujo de agua y nutrientes por el xilema, en ocasiones el estrés generado por el daño al tejido vascular por los cortes al realizar el anillado pueden dañar al grado de matar a la rama (Hartmann et al., 2014). La supervivencia de la rama acodada también se relaciona con el estado nutrimental del árbol, por lo que los más vigorosos tienen mayor probabilidad para sobrevivir mientras ocurre el proceso de rizogénesis en el acodo (Vacek et al., 2012).

En las dosis de AIB probadas, no se obtuvieron diferencias estadísticas; sin embargo, el máximo porcentaje de enraizamiento (35 %) sucedió con la concentración más baja de auxina (10 g kg^{-1}) (Figura 2B); de manera similar en acodos de *Brosimum alicastrum*, el porcentaje de enraizamiento no fue significativo entre acodos con y sin AIB (Ortigoza-García et al., 2025). Estos resultados sugieren que es posible obtener porcentajes aceptables de enraizamiento y supervivencia de acodos en la especie e híbridos evaluados, al usar dosis bajas de auxina. Aunque, generalmente la aplicación exógena en dosis altas de AIB estimula la traslocación rápida y movimiento de fotosintatos para promover el desarrollo de raíces, en algunos casos puede afectar negativamente (Khandaker et al., 2022). Esta respuesta se asocia con el nivel endógeno de auxina que producen las especies, el cual varía de acuerdo con su estado fisiológico y época del año. Si estos niveles son altos, se genera una acumulación excesiva que inhibe el enraizamiento del acodo (Mesén et al., 1997). Algunas especies arbóreas no toleran altas dosis de auxina,

como: *Prosopis chilensis* y *Prunus lusitanica* L. (Moreira et al., 2009; Tarnowski, 2021).

En árboles de 15 años de *P. greggii* se registró un enraizamiento de acodos de 20 a 40 % al aplicar diferentes dosis de AIB, y no se observaron diferencias con el testigo (Becerra & Plancarte, 1993). En otro estudio se registró el enraizamiento de hasta 93.6 % en acodos aéreos de *P. elliottii* al incorporar 1.2 % de concentración de auxina (Hoekstra, 1957). Esto refuerza la idea de que en algunas especies de coníferas no es necesario el uso de dosis elevadas de auxina para promover la formación de raíces en el acodo. Sin embargo, es importante advertir que esta técnica de propagación parece dar mejores resultados al usar material juvenil, como se demostró en *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst. con enraizamiento de 69.2 y 31.5 % en árboles de cinco y 15 años, respectivamente (Ramírez-Malagón et al., 2014). Aunque es necesario realizar más pruebas en las concentraciones de AIB, con el fin de incrementar el enraizamiento en los taxones de pino evaluados, lo cual es el planteamiento central de esta investigación.

Número de raíces y crecimiento de la yema terminal

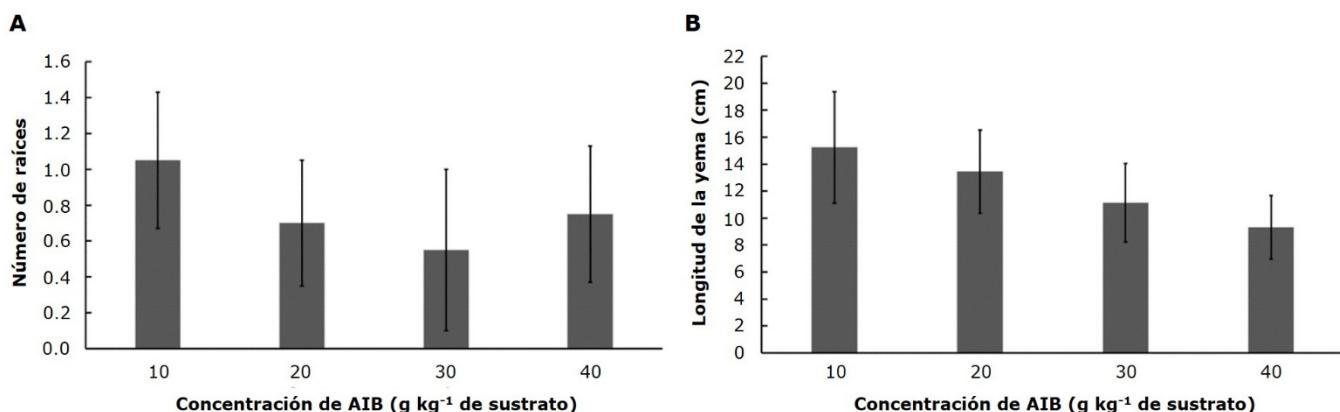
El número de raíces adventicias generadas y el crecimiento de la yema terminal no presentaron diferencias significativas ($P<0.05$) por efecto de ninguno de los factores individuales, ni su interacción (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resultados del análisis de la Transformación de Rangos Alineados del número de raíces y crecimiento de la yema terminal en acodos de tres pinos tropicales.

Factor	GL	Cuadrado de la media	Valor de F	P>F
Número de raíces				
Taxón	2	1 304.4	2.48	0.09
Concentración de AIB (g kg ⁻¹)	3	240.6	0.30	0.82
Taxón×Concentración de AIB	6	576.4	1.10	0.37
Crecimiento de la yema terminal				
Taxón	2	366.3	0.60	0.55
Concentración de AIB (g kg ⁻¹)	3	105.8	0.17	0.91
Taxón×Concentración de AIB	6	37.0	0.06	0.99

GL = Grados de libertad; AIB = Ácido indol-3-butírico.

P. caribaea × *P. tecunumanii* y *P. caribaea* registraron los máximos valores promedio de número de raíces generadas con 1.17 y 0.78, respectivamente (Figura 3A). Ambos superaron en 87 y 80 %, respectivamente, a la generación de raíces de los acodos de *P. elliottii* × *P. caribaea* (0.15 raíces en promedio), lo que demuestra la menor capacidad de este último para desarrollar raíces adventicias y coincidió con el menor porcentaje de enraizamiento (10 %). A nivel de fenotipo dentro de un taxón, el número de raíces que desarrolló el acodo varió significativamente de 12.6 a 21.7 en *Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh (Liao-Torres et al., 2012). Se carece de publicaciones sobre el número de raíces generadas en acodos de pino, pero los promedios que se obtuvieron en el presente estudio fueron menores al de otras especies leñosas como *Lasiococca comberi* Haines (2.2 a 14.5), *Syzygium samarangense* (14.3), *Pistacia vera* L. (2.2) y *Brosimum alicastrum* (8 a 12) (Kamila & Panda, 2019; Khandaker et al., 2022; Noori et al., 2019; Ortigoza-García et al., 2025).



A = Número de raíces generadas; B = Longitud de la yema terminal. Barras de error expresan el error estándar.

Figura 4. Variables de crecimiento de acodos aéreos por concentración de AIB.

Interacción entre factores

La interacción entre los factores (taxón×concentración de AIB) no tuvo diferencias significativas para ninguna variable (cuadros 2 y 3). La interacción en el enraizamiento, supervivencia, número de raíces y crecimiento de la rama fluctuó de 0 a 48 %, 37.5 a 80 %, 0 a 2.1 y 6.6 a 21.9 cm, respectivamente. Los valores máximos se obtuvieron con las siguientes combinaciones: en el enraizamiento, *P. caribaea* × *P. tecunumanii* con 10 g kg⁻¹ de AIB (48 %). Para la supervivencia, *P. elliottii* × *P. caribaea* con 30 g kg⁻¹ de AIB (80 %). Para el número de raíces fue con *Pinus caribaea* y 20 g kg⁻¹ de AIB (2.1). En cuanto a la longitud de la yema, *P. elliottii* × *P. caribaea* y 20 g kg⁻¹ de AIB (21.9 cm). Aunque el análisis no detectó diferencias, estos valores máximos promedio, proporcionan una idea reservada sobre la concentración de AIB que favorece en cada uno de los tres taxones para las variables evaluadas.

Conclusiones

Los taxones utilizados en este estudio tuvieron un desempeño similar en el enraizamiento del acodo, respuesta que puede estar relacionada con la proximidad taxonómica que mantienen entre ellos. Con las dosis probadas de AIB y aplicadas en el sustrato del acodo es posible obtener hasta 35 % de enraizamiento; se sugiere continuar con los estudios para determinar la concentración óptima de auxina que incremente el enraizamiento adventicio en los acodos de la especie e híbridos de pinos tropicales. Además, el estudio demostró que este método de propagación asexual es una alternativa viable para conservar y multiplicar a baja escala árboles fenotípicamente superiores de pinos adultos y obtener rametos adaptados a las condiciones locales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza por el acceso al vivero y ensayo procedencias considerados en el desarrollo de esta investigación. A la Secihti, por la beca de posdoctorado otorgada al autor de correspondencia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés

Contribución por autor

Esther Paredes Díaz: redacción de manuscrito, diseño y supervisión de la investigación; Benito González Jiménez: interpretación de resultados, elaboración, revisión y reestructuración del manuscrito; Alberto Pérez Luna: modelación, análisis estadístico y estructuración de resultados; Marcos Jiménez Casas: redacción, revisión y corrección del manuscrito; Norberto Silva Pérez: metodología, ejecución y supervisión del experimento en campo.

Referencias

- Afzal, F., Adnan, M., Rehman, I. U., Noor, M., Khan, A., Iqbal, S., Shah, J. A., Khan, M. A., Roman, M., Wahid, F., Nawaz, S., Pervez, R., & Subhan, F. (2017). Growth response of olive cultivars to air layering. *Pure and Applied Biology*, 6(4), 1403-1409. <https://thepab.org/index.php/journal/article/view/282>
- Amissah, J. N., & Bassuk, N. L. (2004). Clonal propagation of *Quercus* spp. using container layering technique. *Journal of Environmental Horticulture*, 22(2), 80-84. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-22.2.80>
- Asociación Mexicana de Plantadores Forestales A. C. (2016). *Situación actual del germoplasma utilizado en los programas de plantaciones forestales comerciales en el sureste de México. Diagnóstico* [CNF-D42-AA-016RHQ00-1-E827-2016/83]. Comisión Nacional Forestal. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/246716/Situacion_actual_de_germoplasma_utilizado_en_los_proyectos_de_PFC_en_el_sureste.pdf
- Baghel, M., Raut, U. A., & Ramteke, V. (2016). Effect of IBA concentrations and time of air-layering in Guava cv. L-49. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 7(1), 117-120. <https://www.researchgate.net/profile/Vikas->

Ramteke/publication/303785036_Effect_of_IBA_Concentrations_and_Time_of_Air-layering_in_Guava_cv_L-49/

Bautista-Ojeda, G. I., Vargas-Hernández, J. J., Jiménez-Casas, M., & López-Peralta, M. C. G. (2022). Manejo de planta y aplicación de AIB en el enraizado de estacas de *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, 28(1), Artículo e2812060. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812060>

Becerra O., E. C., & Plancarte B., A. (1993). Propagación asexual en *Pinus greggii* mediante injertos, enraizamiento de estacas y acodos aéreos. *Agrociencia*, 3(1), 97-110. <https://ags.fao.org/search/en/providers/123819/records/64735d1353aa8c896309228a>
Benítez-Pardo, D., Flores-Verdugo, F., & Valdez-Hernández, J. I. (2002). Reproducción vegetativa de dos especies arbóreas en un manglar de la costa norte del Pacífico mexicano. *Madera y Bosques*, 8(2), 57-71. <https://doi.org/10.21829/myb.2002.821301>

Burbidge, J. B., Magee, L., & Robb, A. L. (1988). Alternative transformation to handle extreme values of the dependent variable. *Journal of the American Statistical Association*, 83(401), 123-127. <https://doi.org/10.1080/01621459.1988.10478575>
Cabrera-Ramírez, R., Jiménez-Casas, M., López-López, M. Á., & Parra-Piedra, J. P. (2022). Manejo nutrimental de árboles de pino híbrido y uso de ácido indolbutírico para su clonación por estacas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(69), 132-154. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i69.1070>

Central America and Mexico Coniferous Resources Cooperative. (2009). *2009 Annual Report*. North Carolina State University. <https://camcore.cnr.ncsu.edu/files/2015/04/AnnReport-2009-Online.pdf>

Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(Supl. 1), 126-136. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>

Gernandt, D. S., Geada-López, G., Ortiz-García, S., & Liston, A. (2005). Phylogeny and classification of *Pinus*. *Taxon*, 54(1), 29-42. <https://doi.org/10.2307/25065300>

Hartmann, H. T., Kester, D. E., Davies Jr., F. T., & Geneve, R. L. (2014). *Hartmann & Kester's Plant propagation principles and practices* (8th ed.). Pearson Education Limited.

<https://archive.org/details/PlantPropagationPrinciplesAndPracticesByHartmannAndKesters8thEdition>

Hoekstra, P. E. (1957). Air-layering of slash pine. *Forest Science*, 3(4), 344-349.

<https://doi.org/10.1093/forestscience/3.4.344>

Kamila, P. K., & Panda, P. C. (2019). Large-scale vegetative propagation of *Lasiococca comberi* by air layering. *Journal of Tropical Forest Science*, 31(1), 37-42.
<https://doi.org/10.26525/jtfs2019.31.1.037042>

Khandaker, M. M., Saidi, A., Badaluddin, N. A., Yusoff, N., Majrashi, A., Alenazi, M. M., Saifuddin, M., Alam, M. A., & Mhod, K. S. (2022). Effects of indole-3-butiric acid (IBA) and rooting media on rooting and survival of air layered wax apple (*Syzygium samarangense*) cv jambu madu. *Brazilian Journal of Biology*, 82, Article e256277.
<https://doi.org/10.1590/1519-6984.256277>

Liao-Torres, J. O., Imán-Correa, S. A., & Soplín-Ríos, J. A. (2012). Efecto de la ubicación y diámetro de la rama en tres genotipos promisorios de *Myrciaria dubia* (H.B.K.) "camu camu" para propagación vegetativa por acodo aéreo. *Scientia Agropecuaria*, 3(3), 225-233. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2012.03.04>

Mesén, F., Newton, A. C., & Leakey, R. R. B. (1997). Vegetative propagation of *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavon) Oken: the effects of IBA concentration, propagation medium and cutting origin. *Forest Ecology and Management*, 92(1-3), 45-54.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03960-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03960-6)

Moreira, O., Martins, J., Silva, L., & Moura, M. (2009). Propagation of the endangered azorean cherry *Prunus azorica* using stem cuttings and air layering. *Arquipélago-Life and Marine Sciences*, 26, 9-14. <https://core.ac.uk/download/pdf/61434243.pdf>

Noori, I. M., Ahmad, F. K., Aziz, R. R., & Mohammed, A. A. (2019). Propagation of pistachio *Pistacia vera* L. by air layering under the effects of IBA and GA₃ treatments. *Eurasian Journal of BioSciences*, 13, 2001-2004.

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4397855

Nunes, S., Marum, L., Farinha, N., Pereira, V. T., Almeida, T., Sousa, D., Mano, N., Figueiredo, J., Dias, M. C., & Santos, C. (2018). Somatic embryogenesis of hybrid *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and ploidy assessment

- of somatic plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 132, 71-84. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1311-7>
- Ortigoza-García, C. A., Santillán-Fernández, A., Tadeo-Noble, A. E., Rivera-Hernández, B., Carrillo-Ávila, E., & Bautista-Ortega, J. (2025). Viability of grafting and air layering techniques in a *Brosimum alicastrum* Swartz plantation in Campeche, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31, Article e24038. <https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues&numero=325&articulo=2934>
- Puc-Kauil, R., Nava-Nava, A., Paredes-Díaz, E., Ruiz-Aquino, F., Gerónimo-Torres, J. del C., & Ortiz, J. (2024). Funciones alométricas de altura total para pinos tropicales en Puebla, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2), Artículo e4118. <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.4118>
- R Core Team. (2020). *The R Project for Statistical Computing* (version 3.5.3) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>
- Ramírez-Malagón, R., Delgado-Bernal, E., Borodanenko, A., Pérez-Moreno, L., Barrera-Guerra, J. L., Núñez-Palenius, H. G., & Ochoa-Alejo, N. (2014). Air layering and tiny-air layering techniques for mesquite [*Prosopis laevigata* (H. B. ex Willd.) Johnst. M. C.] tree propagation. *Arid Land Research and Management*, 28(1), 118-128. <https://doi.org/10.1080/15324982.2013.813609>
- Saste, S. V., Sananse, S. L., & Sonar, C. D. (2016). On parametric and nonparametric analysis of two factor factorial experiment. *International Journal of Applied Research*, 2(7), 653-656. <https://www.allresearchjournal.com/archives/2016/vol2issue7/PartJ/2-6-122-317.pdf>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2024, 15 marzo). *Información estadística climatológica* [Estación Venustiano Carranza-21142]. Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Singh, S., & Ansari, S. A. (2014). Callus formation impedes adventitious rhizogenesis in air layers of broadleaved tree species. *Annals of Forest Research*, 57(1), 47-54. <https://doi.org/10.15287/afr.2014.189>

- Stuepp, C. A., Wendling, I., Xavier, A., & Zuffellato-Ribas, K. C. (2018). Vegetative propagation and application of clonal forestry in Brazilian native tree species. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(9), 985-1002. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000900002>
- Tarnowski, C. G. (2021). Evaluación de dos técnicas de acodamiento para la propagación vegetativa del algarrobo *Prosopis chilensis* (Mol) Stuntz. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias*, 20(1), 305-315. <https://doi.org/10.14409/fa.v20i1.10272>
- Torres-Ávila, D., de los Santos-Posadas, H. M., Velázquez-Martínez, A., & Tamarit-Urias, J. C. (2020). Ahusamiento y volumen comercial de tres procedencias de pinos tropicales en plantaciones forestales de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 26(3), Artículo e2631890. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631890>
- Uribe, M. E., Delaveau, C., Garcés, M., & Escobar, R. (2008). Efecto de asepsia y fitohormonas en el establecimiento *in vitro* de *Berberidopsis corallina*, a partir de segmentos nodales. *Bosque*, 29(1), 58-64. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000100007>
- Vacek, S., Hejčmanová, P., & Hejčman, M. (2012). Vegetative reproduction of *Picea abies* by artificial layering at the ecotone of the alpine timberline in the Giant (Krkonoše) Mountains, Czech Republic. *Forest Ecology and Management*, 263, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.037>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.