



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i69.1070>

Artículo

Manejo nutrimental de árboles de pino híbrido y uso de ácido indolbutírico para su clonación por estacas

Nutritional management of hybrid pine trees and use of indole butyric acid for cloning by cuttings

Rosmeri Cabrera Ramírez¹, Marcos Jiménez Casas^{1*}, Miguel Ángel López López¹, José Pastor Parra Piedra²

Abstract

Young tree cuttings generally show low rooting rates, thus making cloning difficult. Fertilization and programmed pruning of the young trees help production of juvenile cuttings. The exogenous application of auxins promotes roots formation. This work analyzes the effect of nutrient management of four-year-old donor trees of the hybrid *Pinus elliottii* var. *elliotti* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, as well as that of the auxin Indolbutyric acid (IBA) on rooting of cuttings. In a complete block design with factorial arrangement, we evaluated the application of five nutrients or combinations of them to trees. The treatments and doses per tree were: control, nitrogen (80 g), phosphorus (20 g), magnesium (10 g) and nitrogen/phosphorus (80/20 g). Additionally, we tested two doses of IBA (0 and 3 000 ppm) on cutting rooting. Cutting survival, rooting percentage and root morphology were recorded after 90 days. Nutrient management and IBA improved morphology of primary and secondary roots, as well as rooting of the cuttings by more than 30 %, compared to the control treatment. This allowed greater survival of cuttings during the root formation process. Treatment with N+P gave rise to the best response, which was over 60 %, in all variables evaluated. Cloning of young trees of the hybrid by the technique of cutting rooting is possible with the support of a program of fertilization applied as a management practice for donor plant and the use of IBA as well.

Key words: Auxins, rooting, nutritional diagnosis, nutrition, donor plant, vegetative propagation.

Resumen

Las estacas de árboles jóvenes de pino presentan bajas tasas de enraizamiento, lo que dificulta su clonación; sin embargo, la fertilización y podas programadas promueven la producción de estacas juveniles. La aplicación exógena de auxinas favorece la formación de raíces. En este trabajo se analiza el efecto del manejo nutrimental de los árboles donadores, de cuatro años de edad, del híbrido *Pinus elliottii* var. *elliotti* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y del ácido indolbutírico (AIB) en el enraizamiento de estacas. En un diseño de bloques completos con arreglo factorial, se evaluó la aplicación de cinco nutrimentos o mezclas de ellos a los árboles. Los tratamientos y dosis por árbol fueron: testigo, nitrógeno (80 g), fósforo (20 g), magnesio (10 g) y nitrógeno/fósforo (80/20 g). Además, se probaron dos dosis de AIB (0 y 3 000 ppm) para el enraizamiento. La supervivencia de estacas, el porcentaje de enraizamiento y la morfología de raíces, se registraron después de 90 días. El manejo nutrimental y el AIB mejoraron tanto la morfología de raíces primarias y secundarias, como el enraizamiento de estacas en más de 30 %, respecto a sus testigos. Lo anterior permitió una mayor supervivencia de estacas durante la formación de raíces. Con el tratamiento de N+P se obtuvo la mejor respuesta, superior a 60 %, en todas las variables evaluadas. La clonación de árboles jóvenes del híbrido, por el enraizamiento de estacas, es posible con el apoyo de un programa de fertilización, aplicado como parte del manejo del árbol donador y el uso de AIB.

Palabras clave: Auxina, enraizamiento, diagnóstico nutrimental, nutrición, planta donadora, propagación vegetativa.

¹Colegio de Postgraduados, Posgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo, México.

²Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: marcosjc@colpos.mx

Introducción

Los híbridos de *Pinus elliottii* var. *elliotti* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* desarrollados en Australia superan a sus especies parentales en crecimiento, forma y resistencia al viento (Nikles, 2000). En México, se han plantado miles de hectáreas con este híbrido para producción de resina y madera (Conafor, 2016). Genotipos superiores del híbrido deben ser clonados para acelerar la producción de planta requerida por la industria.

La clonación vegetal permite maximizar la producción, calidad y uniformidad en las plantaciones. En árboles, el proceso de clonación se dificulta debido a que su estado de maduración fisiológica afecta la producción de estacas o esquejes y su capacidad de enraizamiento (Majada *et al.*, 2011). La técnica de enraizamiento de estacas incluye el rejuvenecimiento, a través de podas programadas para la obtención de estacas juveniles de varias especies de *Pinus* con buena respuesta al enraizamiento (Riov *et al.*, 2020).

El rebrote es una característica de algunas especies forestales para recuperar su biomasa aérea después de presentar algún daño; respuesta que depende, en gran medida, de las reservas de carbono existentes en los tejidos del árbol para producir la cantidad de rebrotes necesarios (Smith *et al.*, 2018). Esta capacidad de rebrote se aprovecha, a través de podas de la planta madre para obtener estacas y clonar genotipos de *Pinus thunbergii* Parl., *Picea abies* L. Karst. y *Pinus patula* Schltdl. et Cham. (Tikkinen *et al.*, 2018; Matsunaga and Ohira, 2019; Escamilla-Hernández *et al.*, 2020).

Estacas vigorosas más aptas para enraizar se forman en plantas donadoras bien fertilizadas (Hernández y Rubilar, 2012). Plantas Madre de *Pinus taeda* L. tratadas con fertilizantes incrementaron sus niveles de reservas de carbono (carbohidratos), lo cual mejoró la producción y enraizamiento de estacas (Rowe *et al.*, 2002). En otras investigaciones, también se cita que la fertilización de plantas Madre con

cantidades adecuadas de nitrógeno y fósforo influye en la producción de brotes y en su rápido enraizamiento adventicio (Moe y Andersen, 1988).

La mayoría de las estacas de las especies del género *Pinus* son de difícil enraizamiento, por lo que se ha recurrido al uso de auxinas sintéticas (Coimbra *et al.*, 2016). La auxina más utilizada es el Ácido Indolbutírico (AIB), debido a su estabilidad y solubilidad (Tilahun *et al.*, 2019). En pinos mexicanos, el AIB mejora los porcentajes de enraizamiento de estacas en más de 45 %, para *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. (Cuevas *et al.*, 2015) y en 90 % para *P. jaliscana* Pérez de la Rosa (Aparicio-Rentería *et al.*, 2008).

En este trabajo, se probó la clonación mediante uno de los métodos más prácticos y de bajo costo, como es el enraizamiento de estacas de algunos genotipos superiores del híbrido de *P. elliotii* var. *elliotti* × *P. caribaea* var. *hondurensis* que han evidenciado crecimiento superior y rectitud de fuste. Dado que los árboles donadores presentan cierta madurez fisiológica, la capacidad de rebrote para producción de estacas y su facilidad para enraizar son limitadas. Por lo tanto, el objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del manejo nutrimental de los árboles donadores de cuatro años de edad del híbrido *P. elliotii* var. *elliotti* × *P. caribaea* var. *hondurensis*, y del uso de AIB sobre el enraizamiento de estacas, con la finalidad de propagar vegetativamente los mejores genotipos de una plantación y establecer, en el futuro, plantaciones clonales de la especie.

Materiales y Métodos

Localización del experimento

El experimento se estableció en el invernadero de la Jefatura de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza (ITSVC), ubicado entre las coordenadas geográficas 20°28´19.6" latitud N y 97°41´56.4" longitud O; a una altitud de 333 m, en Lázaro Cárdenas, Puebla.

Material vegetal y análisis nutrimental

En julio del 2019, en una plantación de cuatro años de edad del híbrido *P. elliottii* var. *elliottii* × *P. caribaea* var. *hondurensis*, localizada dentro de las instalaciones del ITSVC, se seleccionaron 25 árboles con mejor crecimiento, libres de plagas y rectitud de fuste. Se obtuvo una muestra del follaje (aproximadamente 200 g de material verde) de cada árbol seleccionado para el análisis del estado nutricional, Las muestras se colocaron en bolsas de papel para su traslado al Laboratorio del Posgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados, donde se lavaron con agua corriente y agua destilada, se secaron en estufa (modelo *Shel lab*, 1675-S) por 48 horas a 70 °C. Posteriormente, se hicieron tres muestras compuestas de 60 g de materia seca cada una; las cuales se molieron y procesaron para su análisis químico en el Laboratorio Salvador Alcalde Blanco del Posgrado en Edafología en el Colegio de Postgraduados. En cada muestra se determinaron las concentraciones de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, cobre, zinc, manganeso y boro; para ello, se utilizó el extracto por digestión húmeda del follaje con ácido sulfúrico *Merck*[®], ácido perclórico *Merck*[®] y peróxido de hidrógeno *Merck*[®] (1.3:0.7:1, v:v:v), excepto para el N (Alcántar y Sandoval, 1999). Los extractos se leyeron en un equipo de espectrometría de emisión e inducción por plasma (*Agilent* 725 Series ICP-OES). La concentración de N se determinó en una alícuota de 10 mL del extracto antes descrito, mediante destilación de la muestra y valoración a través de titulación con ácido sulfúrico (Alcántar y Sandoval, 1999).

Los análisis foliares se interpretaron mediante las concentraciones críticas citadas por Dickens *et al.* (2016) para *Pinus elliottii* Engelm. ex Parl. y las sugeridas por Xu *et al.* (2000) para *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*.



Aplicación de tratamientos de fertilización

De acuerdo con el análisis nutrimental (Cuadro 1), se prescribió la aplicación de cinco tratamientos de fertilización, basados en soluciones preparadas con agua corriente: T1 testigo (solo agua), T2 Nitrógeno (80 g de urea por árbol), T3 Fósforo (20 g de ácido fosfórico por árbol), T4 Magnesio (10 g de sulfato de magnesio por árbol) y T5 Nitrógeno + Fósforo (80 y 20 g de urea y ácido fosfórico por árbol, respectivamente).

Cuadro 1. Concentraciones nutrimentales foliares en los árboles seleccionados de *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y concentraciones críticas foliares citadas para *Pinus elliottii* Engelm. ex Parl. (Dickens *et al.*, 2016) y para el híbrido (Xu *et al.*, 2000).

Elementos	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	%	ppm								
CF SE	0.82*	0.14	0.44	0.25	0.10*	59.6	2.50	18.2	88.3	6.4
CC PE *	1.00	0.09	0.25	0.08	0.06	15.0	1.50	10.0	20.0	4.0
CC PE × PC**	0.96	0.06	0.06	0.10	0.11	-	2.24	16.1	55.0	-

* Deficiencias; CF = Concentración foliar; SE = Sitio experimental; CC = Concentración crítica; PE = *Pinus elliottii*; PC = *Pinus caribaea*.

En noviembre del 2019, se realizó el experimento con los tratamientos bajo un diseño completamente al azar; cada tratamiento fue aplicado aleatoriamente a cinco árboles. En el experimento se consideró un total de 25 árboles. La aplicación de las soluciones se hizo dentro de un cajete de aproximadamente 1 m de diámetro alrededor de cada árbol.

Después de un mes de la fertilización, todos los individuos fueron podados. La poda se llevó a cabo en la punta de ocho ramas ubicadas en el segundo tercio de la copa de cada árbol, para ello se usaron tijeras con mango telescópico. Esta acción tuvo la

finalidad de inducir la producción de brotes adventicios. Durante el experimento se realizaron deshierbes continuos, para evitar una competencia por nutrimentos.

Recolecta y preparación de estacas

En febrero del 2020, los rebrotes (estacas) alcanzaron una longitud superior a 5 cm, por lo que se recolectaron. En la base de cada estaca, se hizo un corte en bisel con un bisturí desinfectado con alcohol (70 %). Enseguida, las estacas se colocaron en una solución de Captan (Adama México) (2 mL L^{-1}), donde permanecieron sumergidas por 5 minutos.

Plantación y aplicación de AIB

La sección basal (2 cm) de cada estaca se sumergió en la solución del AIB en forma líquida (Radix® 3 000) por un lapso de 20 segundos; para el testigo, solo se utilizó agua corriente en el mismo lapso de tiempo; a continuación, se plantaron en un sustrato compuesto por una mezcla de *peat most*, agrolita y vermiculita (3:1:1). Previo a la plantación, el sustrato se llevó a capacidad de campo, con agua corriente. El ensayo se estableció en cámaras de enraizamiento de 120 cm de largo por 60 cm de ancho y 15 cm de altura, las cuales se construyeron con tablas de madera y láminas de policarbonato. Durante el experimento, en las cámaras se registró una humedad relativa de 80 % y una temperatura promedio de 20 °C.



Diseño experimental y variables evaluadas

El experimento se estableció bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial; cada cámara de enraizamiento representó un bloque. Como factor A se consideró al AIB con dos niveles (0 y 3 000 ppm); mientras que, el factor F fue la fertilización (realizada a los árboles Madre o donadores) con cinco niveles (testigo, nitrógeno, fósforo, magnesio, y la combinación nitrógeno y fósforo), para un total de 10 tratamientos en cada bloque. El experimento se replicó cuatro veces, cada unidad experimental estuvo constituida por ocho estacas: 320 estacas.

En abril del 2020, a las 11 semanas de realizada la plantación, se registró el número de estacas vivas, número de estacas con raíces, número de raíces primarias y secundarias, longitud de raíces primarias y número de estacas con formación de callo. Con esto, se determinó el porcentaje de supervivencia de estacas, porcentaje de estacas enraizadas, número de raíces primarias y longitud de la raíz principal, número de raíces secundarias y porcentaje de estacas con formación de callo. Las estacas se consideraron muertas cuando más de la mitad de su tejido, a partir de la base, fue necrótico en el momento de la evaluación. Las enraizadas, cuando presentaron al menos una raíz con 0.5 cm de longitud.

Análisis de datos

Con los valores promedio de las variables respuesta se llevó a cabo el análisis estadístico, mediante el procedimiento *Mixed* en el paquete de análisis estadístico SAS (*Statistical Analysis System*®) versión 9.4 (SAS, 2013). Para verificar los supuestos del análisis de varianza paramétrico, se emplearon la prueba de *Shapiro Wilk* para normalidad y la de *Levene* y *Barlett* para homogeneidad. Entonces, las variables expresadas en porcentaje (enraizamiento, callo y supervivencia) se transformaron con la función arco seno de la raíz cuadrada del valor original

expresado en fracción decimal, ya que los datos en la escala original no cumplían con los criterios de normalidad y homogeneidad de varianza. Un procedimiento similar se efectuó para las variables número de estacas con raíces, número de raíces primarias y secundarias y longitud de raíces primarias que mostraron distribución tipo *Poisson*; en este caso se usó la raíz cuadrada del valor original. Después del análisis, los valores promedio por tratamiento se retransformaron a las unidades originales. El modelo de análisis de varianza empleado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + A_j + F_k + AF_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = ijk -ésima observación en i -ésimo bloque que contiene el j -ésimo nivel del factor A y el k -ésimo nivel del factor F

μ = Media general

B_i = Efecto del i -ésimo bloque

A_j = Efecto del i -ésimo nivel del factor A (auxina)

F_k = Efecto del i -ésimo nivel del factor F (fertilización)

AF_{jk} = Interacción entre i -ésimo nivel del factor A y del factor F

ε_{ijk} = Error experimental

En las variables que presentaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación de medias de *Tukey* ($\alpha = 0.05$) para determinar diferencias estadísticas entre los niveles de los factores en estudio.



Resultados y Discusión

Efectos del AIB y fertilización de la planta madre

Los tratamientos de AIB y fertilización tuvieron efectos significativos en la supervivencia, estacas enraizadas, longitud de raíz principal, número de raíces primarias (excepto para AIB) y número de raíces secundarias; mientras que, la interacción entre los tratamientos solo se presentó en las estacas enraizadas (Cuadro 1). Por otro lado, ambos tratamientos no influyeron en el desarrollo del callo observado en las estacas vivas sin raíces (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de *P* del análisis de varianza para las variables de enraizamiento de las estacas del híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Fuente de variación	%SE	%Callo	%EE	LRP	NRP	NRS
AIB	0.0091	0.2369	0.0001	0.002	0.0512	0.0055
F	0.0001	0.8170	0.0001	0.001	0.0001	0.0001
AIB × F	0.0511	0.7549	0.0085	0.110	0.0920	0.0599

AIB = Ácido indolbutírico; F = Fertilización; %SE = Porcentaje de supervivencia de estacas; % Callo = Porcentaje de estacas con formación de callo; %EE = Porcentaje de estacas enraizadas; LRP = Longitud de raíz principal; NRP = Número de raíces primarias; NRS = Número de raíces secundarias.

En general, las estacas mantuvieron una supervivencia por arriba de 50 %, lo cual es un porcentaje aceptable para la propagación por estacas (Cuadro 3). El porcentaje de supervivencia de estacas tratadas con AIB resultó 25 % mayor comparado con los testigos y también incrementó el porcentaje de enraizamiento en poco más de 35 % (Cuadro 3). De acuerdo con estos resultados, se puede deducir

que la auxina influye de manera directa en la promoción de raíces, de manera particular, en aquellas estacas que probablemente requerían del estímulo del regulador hormonal externo para desarrollarlas. La presencia de raíces en las estacas les permite reactivar sus funciones fisiológicas y conformarse como una plántula. De otra manera, las estacas sin raíces pueden sobrevivir hasta que las reservas en sus tejidos se agotan, y entonces mueren. Lo anterior coincide con lo señalado por Fachinello *et al.* (2005), quienes indican que la supervivencia de la estaca no solo depende de su calidad (estado nutricional, vigor y juvenilidad), sino también de la rápida formación de raíces adventicias, encargadas de proveer agua y nutrimentos.

Cuadro 3. Valores medios (\pm error estándar), por dosis de Ácido Indolbutírico (AIB) y fertilizante, de porcentajes de supervivencia de estacas, de estacas enraizadas y de estacas con formación de callo en el experimento de enraizamiento de estacas del híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliotti* \times *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

Tratamientos	Supervivencia de estacas (%)	Estacas enraizadas (%)	Estacas con callo (%)
AIB			
0	52.5 \pm 4.3b	32.8 \pm 5.1b	15.0 \pm 3.6a
3000	70.0 \pm 8.1a	53.6 \pm 6.3a	21.2 \pm 5.5a
Fertilizante			
T	34.5 \pm 4.8d	12.5 \pm 9.6d	18.7 \pm 3.6a
N	54.7 \pm 8.8bc	42.2 \pm 9.3bc	12.5 \pm 2.9a
P	76.6 \pm 8.7ab	62.6 \pm 3.1ab	17.2 \pm 2.6a
Mg	51.6 \pm 9.8bc	31.5 \pm 6.8dc	20.3 \pm 4.7a
N+P	89.1 \pm 7.3a	67.2 \pm 2.4a	21.8 \pm 5.1a

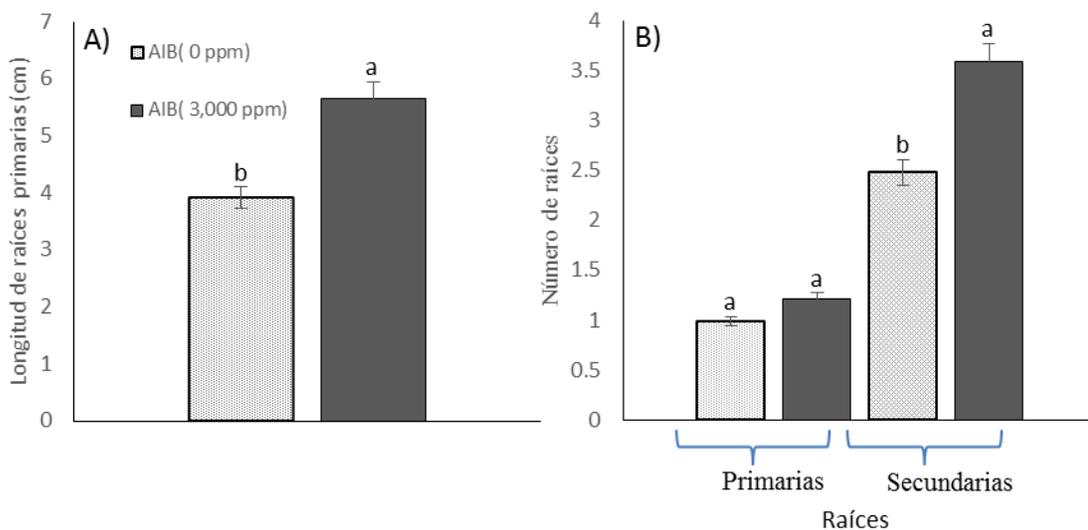
*Letras diferentes indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$).



El uso de AIB en la promoción de raíces adventicias en estacas está bien documentado; esta hormona acelera los procesos de desarrollo y formación de raíces en el menor tiempo posible, con lo cual se asegura la supervivencia de la estaca (Endres *et al.*, 2007; Gratieri-Sossella *et al.*, 2008; Latsague-Vidal *et al.*, 2010).

Un mínimo porcentaje de estacas presentó formación de callo, efecto que en el presente estudio resultó indeseable, ya que las estacas con callo no lograron formar raíces adventicias; sin embargo, su generación no se debió a los tratamientos (Cuadro 3). Las células del callo tienen pérdida de conexión con el tejido conductor, fragilidad y sin definición a estructura radicular (Heaman y Owens, 2011). Para algunas especies, como la sequoia, la formación de callo se considera como una fase inicial indispensable para la posterior formación de raíces (Navroski *et al.*, 2014). En este trabajo no se determinó ningún factor que promoviera la producción de callo en las estacas, pero el ambiente pudo ser relevante en ese proceso.

El AIB no tuvo efecto significativo sobre el número de raíces primarias, pero sí influyó en la producción de raíces secundarias y en la longitud de la raíz primaria (Figura 1). Las estacas tratadas con AIB incrementaron la producción de raíces secundarias en más de 30 %; mientras que, la longitud de la raíz principal lo hizo en 35 %, ambos casos respecto al testigo (Figura 1).



A) Longitud de raíces primarias, B) Número de raíces primarias y secundarias. Dentro de un tipo de raíces, letras diferentes en las barras de error indican diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0.05$).

Figura 1. Efecto de la dosis de Ácido Indolbutírico (AIB) en la producción de raíces en las estacas del híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

En coníferas de difícil enraizamiento, el AIB es un excelente promotor de raíces adventicias. En estacas de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham. se señaló que el AIB no solo induce el enraizamiento de las estacas, sino también alarga las raíces primarias e incrementa el número de las primarias y secundarias (Cuevas *et al.*, 2015); un efecto similar se comprobó en el presente estudio. Sin embargo, también se ha documentado poco o nulo efecto del AIB en la morfología de raíces; por lo que, se considera que la variación en las respuestas al AIB depende tanto de la dosis, como de la menor o mayor predisposición de la estaca al enraizamiento (De Oliveira *et al.*, 2020).

Las auxinas facilitan el enraizamiento, ya que estimulan la actividad del *cambium* y la movilización de reservas hacia el sitio de iniciación de raíces, donde las células se dividen y diferencian para generar los primordios (Dhillon *et al.*, 2011; Brondani *et al.*, 2012). En consecuencia, la aplicación del AIB en las estacas es deseable para mejorar la morfología y calidad de las raíces, lo que a su vez es importante para el desarrollo y crecimiento de la planta, puesto que incrementa el área de absorción de nutrimentos y del agua (Davis y Jacobs, 2005).

Los tratamientos de fertilización favorecieron la supervivencia de las estacas de manera diferenciada, pero siempre por arriba de 50 % (Cuadro 3). Las plantas donadoras tratadas con N+P generaron estacas con una supervivencia superior a 85 %; mientras que, las de plantas testigo no alcanzaron 40 %. Los resultados demuestran la importancia de tener una planta donadora en buena condición

nutricional para producir estacas de calidad. Y son acordes con lo señalado por otros autores, en el sentido que la fertilización adecuada de la planta donadora influye en el nivel de carbohidratos, auxinas y otros compuestos en los tejidos de las estacas, los cuales la mantienen viva mientras inicia el proceso de rizogénesis (Kanmegne *et al.*, 2017).

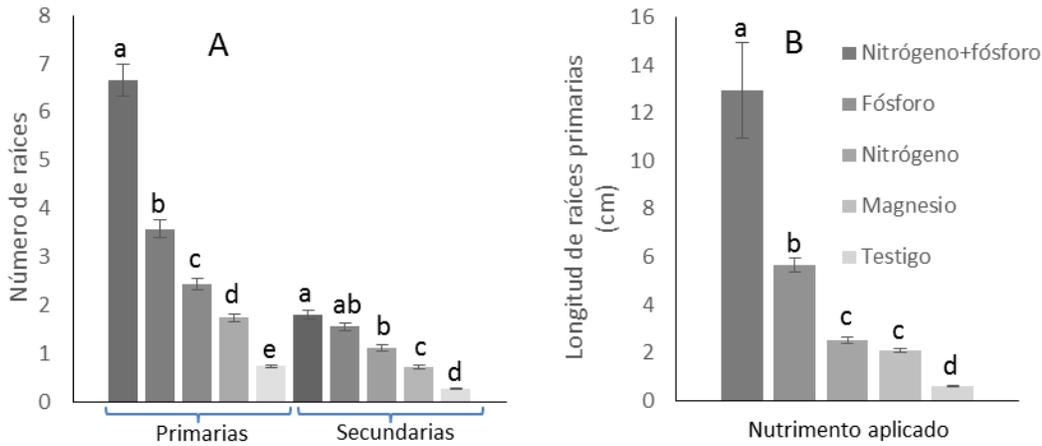
Los tratamientos de fertilización promovieron la formación de raíces. El mayor número de estacas enraizadas se registró con los tratamientos de N+P y solo P, los cuales incrementaron en más de 80 % el enraizamiento, respecto al testigo (Cuadro 3).

En *Pinus radiata* D. Don, la fertilización basada en N, de los setos donadores tuvo un efecto positivo en la inducción de raíces adventicias en las estacas (Hernández y Rubilar, 2012). Dado que el N es un constituyente de las proteínas y ácidos nucleicos; además, su participación en el crecimiento de las plantas es esencial; cuando este es absorbido por la planta en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), se incorpora a los meristemas para el crecimiento y desarrollo de las plantas. En el *cambium* de las estacas, el N se requiere para la formación de raíces adventicias (Emer *et al.*, 2019).

El P es un elemento que potencia el metabolismo de la planta y favorece la absorción, combinado con el N y una dosis óptima de auxina favorece una mejor absorción de nutrimentos y desarrollo de raíces en las estacas (Henry y Blazich, 1992). Además, se ha observado una relación significativa entre la concentración de P y el potencial de enraizamiento, lo que refuerza la hipótesis de que el P es importante en la supervivencia postrasplante, vía la promoción de la extensión radical en campo (Planelles, 2004; Oliet *et al.*, 2005). En general, el estado nutricional de la planta incide en los procesos de producción de nuevas raíces (Villar *et al.*, 2004; Oliet *et al.*, 2006).

La longitud de raíces primarias y el número de raíces primarias y secundarias también se afectaron significativamente por los tratamientos de fertilización (Figura 2). En particular, el tratamiento con N+P mejoró en más de 80 % el número de

raíces primarias y secundarias de las estacas, con respecto al testigo sin fertilización; los otros tratamientos de fertilización superaron al testigo por más de 35 % (Figura 2 A). Incrementos similares con los tratamientos de fertilización se obtuvieron en la longitud de la raíz primaria de las estacas (Figura 2 B).



A) Número de raíces primarias y secundarias presentes en las estacas, B) Longitud de raíces primarias de las estacas.

Figura 2. Efecto del fertilizante en la producción de raíces en estacas del híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

La longitud de la raíz principal y el número de raíces primarias y secundarias conforman la arquitectura del sistema radicular de la planta. Por lo tanto, son parámetros importantes para la planta producida por estaca. La fertilización de la planta Madre contribuye en el contenido de carbohidratos de las estacas, las cuales tienen alta demanda durante la formación de raíces adventicias (Otiende *et al.*, 2017). En este trabajo, la fertilización mejoró, considerablemente, esos parámetros. En las estacas no tratadas, es probable que los carbohidratos presentes no cubrieron la demanda de la planta para la generación de nuevas raíces, aunado a que la fotosíntesis en ellas no genera la suficiente cantidad de carbohidratos para los procesos involucrados en la rizogénesis de la estaca (Kanmegne *et al.*, 2017).

De las interacciones de dosis de AIB por el tipo de fertilizante, únicamente se obtuvieron diferencias significativas ($P < 0.05$) para el porcentaje de estacas enraizadas (Cuadro 1). El porcentaje de estacas enraizadas procedente de los árboles tratados con fertilizante se incrementó con el tratamiento de auxina; mientras que, las procedentes de árboles no fertilizados (testigo) disminuyeron con el AIB (Figura 3).

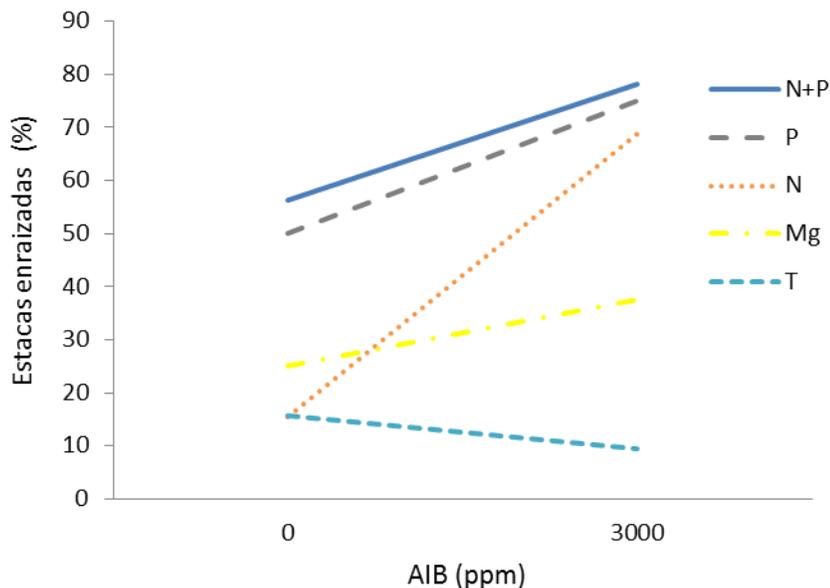


Figura 3. Interacción entre los tratamientos de fertilización de la planta madre y la dosis de AIB en estacas enraizadas del híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Esta interacción implica que la capacidad de enraizar no solamente depende de la aplicación exógena de AIB, sino también de la calidad y vigor de la estaca; por ello, el estatus nutricional de la estaca es de primordial importancia en el proceso de rizogénesis para el híbrido en cuestión. Se sabe que la movilización de nutrientes dentro de la estaca es limitada durante la fase de iniciación de raíces, no así en su crecimiento y desarrollo.

En este caso, las estacas no fertilizadas no se potencializaron con la auxina, como sucedió con las fertilizadas. Probablemente, en estacas no fertilizadas el bajo nivel

de carbohidratos u otros compuestos metabólicos en el tejido limitó el proceso de rizogénesis y disminuyó la capacidad de enraizamiento. Así, desde el punto de vista nutricional, la iniciación de raíces depende, en gran medida, de los niveles iniciales de nutrimentos que se encuentran en la porción de la estaca, donde se formarán las raíces. De ahí el papel fundamental de la nutrición de las plantas Madre sobre el enraizamiento subsecuente de estacas (Mesén *et al.*, 2001; Leakey, 2014).

La formación de raíces adventicias es un proceso dirigido por reguladores de crecimiento, pero es afectado por múltiples factores que incluyen entre otros el estado nutricional de la estaca, por lo que la nutrición mineral es importante en la conformación de estructuras orgánicas, activación de reacciones enzimáticas y de osmorregulación, entre otras (Geiss *et al.*, 2018).

Conclusiones

El manejo de la nutrición de los árboles Madre y la aplicación de AIB a las estacas mejora el proceso de enraizamiento, y con ello se incrementa la probabilidad de supervivencia. En particular, en el sitio de estudio se recomienda la fertilización de los árboles Madre o donadores con N+P, ya que este tratamiento genera estacas con mejores características de enraizamiento. La clonación de árboles jóvenes del híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, por la técnica de enraizamiento de estacas es posible con el apoyo de un programa de fertilización y el uso de AIB.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada durante el programa de maestría del primer autor. Al Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza por las facilidades otorgadas para el acceso y obtención del material en la plantación del pino híbrido.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Rosmeri Cabrera Ramírez: desarrollo de la investigación, toma de datos, análisis estadístico, estructura y diseño del manuscrito; Marcos Jiménez Casas: diseño, supervisión del experimento, análisis de los resultados, redacción y corrección del manuscrito; Miguel Ángel López López: diseño, supervisión del experimento y corrección del manuscrito; José Pastor Parra Piedra: supervisión y corrección del manuscrito.

Referencias

Alcántar, G. G. y M. V. Sandoval. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Chapingo, Edo. de Méx., México. 156 p.

Aparicio-Rentería, A., C. Jimenez H. y C. M. Ruiz O. 2008. Multiplicación clonal de pinos a través del uso de estacas: una alternativa para mantener ganancias genéticas forestales. *Foresta Veracruzana* 10:53-58. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49711434007> (24 de noviembre de 2020).

Brondani, G. E., I. Wendling, A. E. Brondani, M. A. Araujo, A.L. Lopes da S. and A. Natal G. 2012. Dynamics of adventitious rooting in mini-cuttings of *Eucalyptus benthamii* x *Eucalyptus dunnii*. *Acta Scientiarum. Agronomy* 34(2): 169-178. Doi: 10.4025/actasciagron.v34i2.13059.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2016. Situación actual del germoplasma utilizado en los programas de plantaciones forestales comerciales en el Sureste de México. *Diagnóstico*. 109 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/246716/Situacion_actual_de_ger

moplasma_utilizado_en_los_proyectos_de_PFC_en_el_sureste.pdf (4 de noviembre de 2020).

Coimbra C., I. M., O. Alves L., F. De Assis O. e I. Wendling. 2016. Enraizamiento de estacas juveniles de *Bertholletia excelsa* con diferentes concentraciones de ácido indol-butírico. *Agrociencia* 50 (2): 227-238. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v50n2/1405-3195-agro-50-02-00227.pdf> (14 de diciembre 2020).

Cuevas, C., J. C., M. Jiménez C., J. Jasso M., P. Pérez R., J. López U. y A. Villegas M. 2015. Propagación asexual de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 21(1): 81-95. Doi:10.5154/r.rchscfa.2014.08.033.

Davis, A. S. and D. F. Jacobs. 2005. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forests* 30(2): 295-311. Doi: 10.1007/s11056-005-7480-y.

De Oliveira, P., M., A. Camargo Â., M. C. Navroski, L. M. de Oliveira, D. Felipe and C. Moraes. 2020. Mini-cuttings rooting of *Sequoia sempervirens* at different IBA concentrations and clones. *Floresta* 50(2): 1279-1286. Doi:<http://dx.doi.org/10.5380/rf.v50i2.62579>.

Dhillon, R., M.Hooda, J.Pundeer, K. Ahlawat and I. Chopra. 2011. Effects of auxins and thiamine on the efficacy of techniques of clonal propagation in *Jatropha curcas* L. *Biomass and bioenergy* 35(4): 1502-1510. Doi:10.1016/j.biombioe.2010.12.017.

Dickens, E. D., D. J. Moorhead, L. A. Morris and D. Kissel. 2016. Proper Soil Sampling and Analysis for Nutrient Needs Determination in Loblolly, Longleaf, and Slash Pine Stands. http://bugwoodcloud.org/bugwood/fertilization/Soil_Sampling_Pine_Stands_Dec_2016.pdf.

Emer, A. A., E. D. Avrella, C. F. Sidnei and G. Schafer. 2019. Nitrogen fertilization for ministrains of *Campomanesia aurea* O. Bergand its influence on productivity and

rooting of minicuttings at different seasons of the year. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 4(2): 1-8. Doi:10.5039/agraria.v14i2a5632.

Endres, L., P. M. Guimarães M., C. Moura do S. and N Nunez F. de S. 2007. Enraizamento de estacas de Pau-Brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) tratadas com ácido indol butírico e ácido naftaleno acético. *Ciência Rural* 37(3):886-889. Doi: 10.1590/S0103-84782007000300046.

Escamilla-Hernández, N., A. Aldrete, J. J. Vargas-Hernández, Á. Villegas-Monter y M. Á. López-López. 2020. Propagación vegetativa de *Pinus patula* SCHIEDE ex SCHLTDL. et CHAM. en diferentes sustratos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43(2): 215-221. Doi:10.35196/rfm.2020.2.215.

Fachinello, J. C., A. Hoffmann, J. C. Nachtigal and E. Kersten. 2005. Propagação vegetativa por estaquia. Propagação de plantas frutíferas. *Informação Tecnológica*. Embrapa. Brasília, Brasil. pp. 69-109.

Geiss, G., L. Gutierrez and C. Bellini. 2018. Adventitious root formation: new insights and perspectives. *Annual Plant Reviews* 37: 127-156. DOI:10.1002/9781119312994.apr0400.

Gratieri-Sossella, A., C. Petry and A. A. Nienow. 2008. Propagação da corticeira do banhado (*Erythrina crista-galli* L.)(Fabaceae) pelo processo de estaquia. *Revista Árvore* 32(1): 163-171. Doi: 10.1590/S0100-67622008000100018.

Henry, P. and F. A. Blazich. 1992. Nitrogen Nutrition of Containerized Eastern Redcedar. II. Influence of Stock Plant Fertility on Adventitious Rooting of Stem Cuttings. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117(4):568-570. Doi: 10.21273/JASHS.117.4.568.

Heaman, J. C. and J. N. Owens. 2011. Callus Formation and Root Initiation in Stem Cuttings of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Canadian Journal of Forest Research* 2(2):121-134. Doi: 10.1139/x72-023.

Hernández, A. and R. Rubilar. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada y fosforada en el desarrollo y fenología de brotes de setos de *Pinus radiata*. Bosque 33(1): 53-61. Doi: 10.4067/S0717-92002012000100006.

Kanmegne, G., H. D. Mbouobda, C. N. Mbakop and D. N. Omokolo. 2017. The influence of stockplant fertilization on tissue concentrations of nitrogen, carbohydrates and amino acids and on the rooting of leafy stem cuttings of *Cola anomala* K. Schum (Malvaceae). New Forests 48: 17-31. Doi: 10.1007/s11056-016-9553-5.

Latsague-Vidal, M., P. Sáez-Delgado, E. Hauenstein-Barra and F. Peña-Cortés. 2010. Propagación vegetativa de *Myrceugenia exsucca* y *Blepharocalyx cruckshanksii*, especies dominantes del bosque pantanoso de la Depresión Intermedia de la región de La Araucanía, Chile. Bosque 31(3): 247-251. Doi: 10.4067/S0717-92002010000300009.

Leakey, R. R. B. 2014. Plant Cloning: Macropropagation. In: Neal Van Alfen (ed) Encyclopedia of Agriculture and Food Systems. Elsevier Publishers. Vol. 4. San Diego, CA, USA pp. 349-359. https://www.researchgate.net/publication/269395064_Leakey_RRB_2014_Plant_cloning_Macro-propagation_In_Encyclopedia_of_Agriculture_and_Food_Systems_Vol_4_349-359_van_Alfen_N_et_al_eds_Elsevier_Publishers_San_Diego_USA/link/5a11c0db0f7e9bd1b2c0f830/download (12 de enero de 2021).

Majada, J., A. C. Martínez, I. Feito, A. Kidelman, I. Aranda and R. Alía. 2011. Mini-cuttings: an effective technique for the propagation of *Pinus pinaster* Ait. New Forests 41(3): 399-412. Doi: 10.1007/s11056-010-9232-x.

Matsunaga, K. and M. Ohira. 2019. Effect of cutting size on rooting ability and first year growth of *Pinus thunbergii* in nursery containers. Journal of Forest Research 24(6): 356-364. Doi: 10.1080/13416979.2019.1675252.

- Mesén, F., R. Leakey and A. Newton. 2001. The influence of stockplant environment on morphology, physiology and rooting of leafy stem cuttings of *Albizia guachapele*. *New Forests* 22: 213-227. Doi: 10.1023/A:1015668011884.
- Moe, R. and A. S. Anderson. 1988. "Stock plant environment and subsequent adventitious rooting". *In*: Davis, T. D., B. E. Haissig and N. Sankhla (eds.). *Adventitious Root Formation in Cuttings*. Dioscorides Press. Portland, OR, USA. pp. 214-234.
- Navroski, M. C., M de Oliveira P., A. F. Hess, R. Silvestre, A. C. Ângelo, A. J. Fazzini and A. A. Alvarenga. 2014. Resgate e propagação vegetativa de *Sequoia sempervirens*. *Floresta* 45: 383-392. Doi:10.5380/rf.v45i2.35407.
- Nikles, D. G. 2000. Experience with some Pinus hybrids in Queensland, Australia. *In*: Dungey, H. S., M. J. Dieters and D. G. Nikles (eds.). *Proceedings of QFRI/CRC-SPF symposium: hybrid breeding and genetics of forest trees*. Department of Primary Industries, Brisbane. Noosa, Queensland, Australia. Pp. 27-43.
- Oliet, J. A., R. Planelles, F. Artero and D. F. Jacobs. 2005. Nursery fertilization and tree shelters affect long-term field response of *Acacia salicina* Lindl. planted in Mediterranean semiarid conditions. *Forest Ecology and Management* 215(1-3): 339-351. Doi: 10.1016/j.foreco.2005.05.024.
- Oliet, J. P., A. Valdecantos D., J. Puértolas S. and R. Trubat D. 2006. Influencia del estado nutricional y el contenido en carbohidratos en el establecimiento de las plantaciones. *In*: Peñuelas-Rubira, J. L., A. Vilagrosa C., R. Savé I. M. y J. Puértolas S. (eds). *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos: estado actual de conocimientos*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Serie Forestal. Madrid, España. pp. 89-118.
- Otiende, M. A., J. O. Nyabundi, K. Ngamau and P. Opala. 2017. Effects of cutting position of rose rootstock cultivars on rooting and its relationship with mineral nutrient content and endogenous carbohydrates. *Scientia Horticulturae* 225: 204-212. Doi:10.1016/j.scienta.2017.07.009.

Planelles G., R. 2004. Efectos de la fertilización NPK en vivero sobre la calidad funcional de plantas de *Ceratonia siliqua* L. Teis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 150 p.

Riov, J., H. Fox, R. Attias, G. Shklar, L. Farkash-Haim, R. Sitbon, Y. Moshe, M. Abu-Abied, E. Sadot and R. David-Schwartz. 2020. Improved method for vegetative propagation of mature *Pinus halepensis* and its hybrids by cuttings, *Israel Journal of Plant Sciences* 67(1-2): 5-15. Doi: <https://doi.org/10.1163/22238980-20191118>.

Rowe, D. B., F. A. Blazich and C. D. Raper. 2002. Nitrogen nutrition of hedged stock plants of loblolly pine. I. Tissue nitrogen concentrations and carbohydrate status. *New forests* 24: 39-51. Doi: 10.1023/A:1020555013964.

Statistical Analysis System (SAS). 2013. SAS Statistical Analysis System V.9.4. Computer software. Institute Inc. Cary, NC, USA. 5121 p.

Smith, M. G., S. K. Arndt, R. E. Miller, S. Kasel and L. T. Bennett. 2018. Trees use more non-structural carbohydrate reserves during epicormic than basal resprouting. *Tree Physiology* 38(12): 1779–1791. Doi: 10.1093/treephys/tpy099.

Tikkinen, M., S. Varis, H. Peltola and T. Aronen. 2018. Norway spruce emblings as cutting donors for tree breeding and production. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33(3): 207-214. Doi: 10.1080/02827581.2017.1349925.

Tilahun, A., B. Manahlie, G. Abebe and G. Negash. 2019. Effect of cutting position and indole butyric acid (auxin) concentration on rooting response of *Araucaria heterophylla*. *African Journal of Biotechnology* 18(4): 86-91. Doi: 10.5897/AJB2018.16450.

Villar, S., P., R. Planelles, E. Enriquez and J. P. Rubira. 2004. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationships in the Mediterranean oak *Quercus ilex* L. *Forest Ecology and Management* 196(2-3): 257-266 pp. Doi: 10.1016/j.foreco.2004.02.061.

Xu, Z. H., P. G. Saffigna, G. D. Farquhar, J. A. Simpson, R. J. Haines, S. Walker, D. O. Osborne and D. Guinto. 2000. Carbon isotope discrimination and oxygen isotope composition in clones of the F1 hybrid between slash pine and Caribbean pine in relation to tree growth, water-use efficiency and foliar nutrient concentration, *Tree Physiology* 20(18): 1209-1217. Doi:10.1093/treephys/20.18.1209.



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.