elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

# Sin semillas, pero con vida: la clonación de pinos por estacas

Yaiza Sabrina Suárez Hernández[1]*

[1] Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales

* Dirección para correspondencia: yaizasabrinash@gmail.com

Manuscrito aceptado

Los pinos son árboles que todos han visto alguna vez: altos, de copa triangular y con sus características hojas similares a agujas (acículas) y piñas (estróbilos). Pertenecen al género *Pinus* y son probablemente las coníferas más reconocibles en todo el mundo. Su historia es impresionante: sus ancestros aparecieron hace aproximadamente 300 millones de años, durante el período Carbonífero (Hilton *et al*., 2003), cuando los dinosaurios aún no existían, y el grupo de pinos que conocemos hoy comenzó a diversificarse durante el Cretácico Inferior, compartiendo el planeta con los últimos dinosaurios.

Estos árboles se distinguen por características como su corteza, que puede variar desde tonos rojizos hasta grises, y sus acículas, que crecen en grupos de 2 a 5, dependiendo de la especie, y pueden medir desde unos pocos centímetros hasta más de 20 cm de largo.

México es un verdadero paraíso para los pinos, también conocido como centro de diversificación. Gernandt y Pérez (2014) señalan que, de las aproximadamente 120 especies que existen en el mundo, ¡el 47 % de ellas (57 especies) se encuentran en nuestro país! Esta extraordinaria diversidad ha

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

convertido a México en un centro crucial para la evolución de estos árboles. Algunas especies mexicanas, como el *Pinus patula*, han demostrado ser tan valiosas que se cultivan comercialmente en plantaciones forestales alrededor del mundo.

Entre la gran variedad de pinos mexicanos, cuatro especies han captado especialmente la atención de los científicos: el pino blanco (*Pinus pseudostrobus*), el pino prieto (*P. greggii*), el pino de las alturas (*P. hartwegii*) y el pino montezuma (*P. montezumae*). Estos árboles son fundamentales en sus ecosistemas: proporcionan alimento y refugio a numerosas especies de aves, insectos y hongos. Sus raíces ayudan a prevenir la erosión del suelo, y sus copas crean microclimas que permiten el desarrollo de una variada vegetación. Han desarrollado adaptaciones sorprendentes: algunas especies, como *P. canariensis* y *P. hartwegii* Lindl., necesitan el calor de los incendios forestales para propiciar la fecundación de sus semillas, garantizando así la regeneración del bosque. Otros pinos, entre ellos *P. hartwegii*, pueden crecer en altitudes superiores a los 4,000 metros, donde las condiciones son extremadamente duras.

Actualmente, varios bosques de pinos enfrentan amenazas como la tala ilegal, los incendios forestales no naturales y el cambio climático. La conservación de estas especies es crucial para mantener la biodiversidad y los servicios ambientales que proporcionan.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

**La propagación de los pinos: ¿semillas o clones?**

Cuando se piensa en cultivar pinos, surge la interesante disyuntiva: ¿se deberían usar semillas o crear copias exactas de los mejores árboles?

La naturaleza ofrece el método tradicional: las semillas. Este proceso de reproducción sexual ha funcionado durante millones de años, pero presenta un desafío para las plantaciones comerciales. Al igual que los hijos de una familia no son idénticos entre sí, los pinos que crecen a partir de semillas pueden resultar muy diferentes unos de otros: algunos crecerán altos y robustos, mientras que otros podrían ser más bajos o delgados; incluso la calidad de su madera puede variar significativamente.

Por otro lado, existe la propagación vegetativa, que se define como la producción de plantas con características genéticas idénticas a la planta madre y se puede lograr mediante técnicas de injertado, enraizamiento de estacas o cultivo *in vitro*. Imagina que encontramos un pino excepcional: alto, fuerte, resistente a enfermedades y con madera de primera calidad. ¿No sería fantástico poder reproducir exactamente esas características? Rivera-Rodríguez *et al*. (2016) explican que esto es posible tomando una parte del árbol –ya sea del tallo, la raíz o una hoja– y cultivándola bajo condiciones específicas hasta que desarrolle sus propias raíces y brotes.

¿Por qué es esto tan importante? Diversos estudios señalan que esta técnica permite maximizar el rendimiento y asegurar la uniformidad en las plantaciones

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

comerciales. Además, como destacan Rivera-Rodríguez *et al*. (2016), citando a Poupard *et al*. (1994), es posible seleccionar árboles con características especialmente deseables, como resistencia a enfermedades o formas específicas de crecimiento.

**Hormonas en acción: el papel del ácido indol-3-butírico (AIB)**

Las estacas, para sobrevivir, requieren generar un sistema radicular (figura 1), mismo que está conformado por raíces adventicias y que puede ser inducido por factores endógenos, como las fitohormonas, y exógenos, como las auxinas sintéticas.

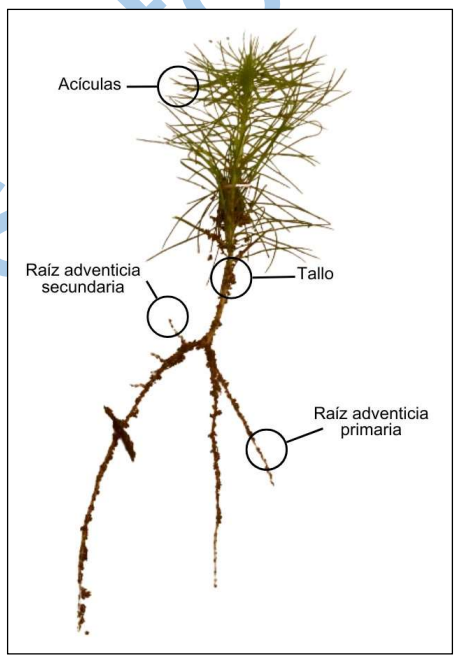


**Figura 1.** Partes de una estaca de pino enraizada. Foto: Yaiza Sabrina Suárez Hernández.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

Las auxinas son un grupo de reguladores del crecimiento que incluyen compuestos naturales y sintéticos con un impacto significativo en el desarrollo de las raíces (Bellini *et al*., 2014). Dentro de estas, el ácido indol-3-butírico (AIB) es uno de los más utilizados en la propagación de pinos, debido a su estabilidad y eficacia en el transporte dentro de la planta (Stuepp *et al*., 2017); su aplicación acelera la iniciación de raíces adventicias y mejora la uniformidad del enraizamiento (Bautista-Ojeda, 2022).

Y, aunque las auxinas son las principales promotoras del enraizamiento, otras fitohormonas también influyen en este proceso. Las citoquininas, en bajas concentraciones, favorecen la formación de raíces en *Pinus radiata*. Por otro lado, el etileno puede actuar de manera sinérgica o antagónica con las auxinas, dependiendo del contexto. El ácido abscísico (ABA), en la mayoría de los casos, inhibe la formación de raíces adventicias, mientras que las giberelinas tienen efectos variables según la especie y las condiciones ambientales (Bellini *et al*., 2014). Además, los jasmonatos, brassinosteroides y estrigolactonas –fitohormonas– participan en la regulación del desarrollo radicular a través de interacciones complejas con las auxinas.Entonces, el AIB se utiliza frecuentemente en la clonación de pinos mediante la inmersión de las superficies de corte en soluciones de diferentes concentraciones. Por ejemplo, Sedaghathoor *et al*. (2016) reportaron que en *Pinus mugo*, el porcentaje de enraizamiento aumentó del 14 % sin tratamiento al 55 % con la aplicación de AIB y ácido naftalenacético (ANA).

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

En *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, Henrique *et al*. (2006) encontraron que el AIB es más efectivo que el ANA, con una dosis óptima que alcanzó un 95,31 % de enraizamiento. Por otra parte, Bautista-Ojeda *et al*. (2022) reportaron que, en *Pinus patula*, la aplicación de AIB en solución resultó en más del 70 % de enraizamiento en estacas de plantas de 15 a 18 meses de edad, cuando se combinó con fertilización adecuada en invernadero.

A pesar de su eficacia en muchas especies, el AIB no siempre garantiza el enraizamiento. En *Pinus leiophylla*, Cuevas-Cruz *et al*. (2015) encontraron que la aplicación de esta auxina no aumentó significativamente la probabilidad de enraizamiento, aunque sí estimuló la producción de raíces primarias. Esto resalta la importancia de considerar las características específicas de cada especie al diseñar estrategias de propagación vegetativa.

**Factores clave para un buen enraizamiento**

La capacidad de formar raíces en las estacas está estrechamente relacionada con factores genéticos de la planta madre, por lo que se adjudica, en parte, a los procesos bioquímicos y fisiológicos que ocurren durante el desarrollo y que, en última instancia, se ven afectados por las diferencias genéticas dentro y entre especies. Por ejemplo, los árboles del género *Eucalyptus* suelen tener un enraizamiento muy rápido y vigoroso, a diferencia de los del género *Pinus*.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

Sin embargo, otras características determinantes para el enraizamiento de estacas son el uso de tejido juvenil, la concentración endógena de hormonas vegetales, las reservas de carbohidratos y el grado de lignificación del tallo, también relacionadas con la posición de la estaca en la planta madre, así como con la nutrición de esta (Steffens y Rasmussen, 2016). Ma *et al.* (2021) mencionan que el envejecimiento de la planta madre en especies de *Pinus* afecta notablemente la capacidad de enraizamiento durante la propagación vegetativa, ya que los tejidos de ramas adultas presentan una menor aptitud para formar raíces en comparación con el material juvenil, fenómeno que se debe a cambios fisiológicos y moleculares asociados a la transición de fase juvenil a adulta, regulada por factores como los genes MADS-box, que median el envejecimiento y la competencia reproductiva en pinos, acelerando la pérdida de capacidad regenerativa en tejidos maduros.

Controlar el ambiente de enraizamiento en vivero o invernadero es crucial para mejorar el éxito en la propagación vegetativa, particularmente en especies del género *Pinus*, que requieren condiciones específicas para el desarrollo de raíces adventicias. Las estrategias incluyen el control de factores como la temperatura, la humedad relativa, la luminosidad y la ventilación.

El sustrato utilizado en el enraizamiento también juega un papel relevante en el éxito de la propagación de estacas de *P. patula*. Influye en la producción de raíces, tanto en número como en longitud (Cuevas-Cruz *et al*., 2015). Sedaghathoor *et al*. (2016) analizaron cómo distintos sustratos afectan el enraizamiento de *Pinus mugo*, concluyendo que la elección de un sustrato adecuado mejora

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

considerablemente la formación de raíces. Sustratos con buena retención de humedad y adecuada aireación permiten un equilibrio ideal para el desarrollo radicular, favoreciendo la absorción de nutrientes y facilitando el crecimiento de las raíces en estacas jóvenes.

**¿Por qué clonar pinos? Aplicaciones y beneficios**

Dada la importancia ecológica y productiva de los pinos, así como su amplia distribución y uso en plantaciones forestales, se ha incrementado el interés por desarrollar métodos eficientes de propagación vegetativa. La clonación mediante enraizamiento de estacas se presenta como una estrategia prometedora para la producción masiva de material genético selecto, permitiendo conservar características deseables de las plantas madre (figura 2) y reducir el tiempo necesario para obtener material de plantación de alta calidad.

Este método ofrece ventajas significativas, como la uniformidad genética de las plantas clonadas y un mayor control sobre la calidad del material de propagación. Sin embargo, el éxito del enraizamiento depende de múltiples factores, incluyendo la edad de la planta madre y la aplicación de reguladores del crecimiento. La optimización de estos factores es clave para maximizar la supervivencia y el desarrollo radicular de las estacas, asegurando su viabilidad en viveros y su posterior establecimiento en campo.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

**Figura 2.** Planta madre de pino. Foto: Yaiza Sabrina Suárez Hernández.

Manuscrito aceptado

## Desafíos y futuro de la clonación de pinos

En México, la propagación vegetativa de pinos está cobrando cada vez más relevancia en programas de mejoramiento genético y reforestación. Sin embargo, aún enfrenta desafíos que limitan su implementación a gran escala. La baja tasa de enraizamiento en algunas especies, los costos asociados a la aplicación de reguladores de crecimiento y la infraestructura necesaria son factores que dificultan su adopción generalizada. Además, la edad y condición de la planta madre, la lignificación del tejido y las condiciones ambientales influyen en la capacidad de las estacas para desarrollar raíces, lo que hace necesario continuar investigando estrategias que optimicen el proceso.

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

A pesar de estas limitaciones, la investigación en biotecnología y fisiología vegetal ha permitido avances significativos para mejorar la eficiencia del enraizamiento. El uso combinado de reguladores de crecimiento, la optimización de sustratos y el desarrollo de técnicas como el cultivo *in vitro* han abierto nuevas oportunidades para la clonación de pinos. Estos avances no solo favorecen la producción de material vegetal de alta calidad, sino que también contribuyen a la conservación y restauración de los bosques. Con el avance científico, la clonación de pinos se consolida como una estrategia fundamental para elevar la productividad forestal y mitigar los efectos del cambio climático mediante la generación de árboles mejor adaptados y más resistentes. En este sentido, resulta indispensable vincular el conocimiento generado en los laboratorios con su aplicación práctica en campo, integrándolo en políticas forestales, programas de conservación y estrategias de manejo genético que promuevan la sustentabilidad de los ecosistemas forestales.

## Referencias

Bautista-Ojeda GI, Vargas-Hernández JJ, Jiménez-Casas M y López-Peralta MCG (2022). Manejo de planta y aplicación de AIB en el enraizado de estacas de Pinus patula. *Madera y Bosques* 28(1). DOI: https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812060.

Bellini C, Pacurar DI and Perrone I (2014). Adventitious roots and lateral roots: Similarities and differences. *Annual Review of Plant Biology* 65:639–666. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-035645.

Manuscrito aceptado

elementos
Recibido: 04/02/2025
Aceptado: 14/08/2025

Challenger A y Soberón J (2008). Los ecosistemas terrestres. En Soberón J, Halffter G y Llorente-Bousquets J (Eds.), *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 87-108). CONABIO.

Cuevas-Cruz JC, Jiménez-Casas M, Jasso-Mata J *et al*. (2015). Propagación asexual de Pinus leiophylla Schiede ex Schltdl. et Cham. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 21(1):81–95. DOI: https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.08.033.

Hilton J, Wang S, Tian B and Li C (2003). Evidence for conifer origins and early evolution from the late palaeozoic cathaysian flora of south east asia. *Acta Hortic* 615:59-65. DOI: https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.615.3.

Ma J, Chen X, Song Y *et al*. (2021). MADS-box transcription factors MADS11 and DAL1 interact to mediate the vegetative-to-reproductive transition in pine. *Plant Physiology 187*(1):247-262. DOI: https://doi.org/10.1093/plphys/kiab250.

Rivera-Rodríguez MO, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J *et al.* (2016). Enraizamiento de estacas de *Pinus patula*. *Fitotecnia Mexicana* 39(4):385–392. DOI: https://acortar.link/vT0ZMO.

Sedaghathoor S, Kayghobadi S and Tajvar Y (2016). Rooting of mugo pine (*Pinus mugo*) cuttings as affected by IBA, NAA and planting substrate. *Forest Systems* 25(2):1-4. DOI: https://doi.org/10.5424/fs/2016252-09087.

Steffens B and Rasmussen A (2016). The physiology of adventitious roots. *Plant Physiology* 170(2):603–617. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.15.01360.

Stuepp CA, Wendling I, Trueman SJ *et al*. (2017). The use of auxin quantification for understanding clonal tree propagation. *Forests* 8(1):1-15. DOI: https://doi.org/10.3390/f8010027.

Manuscrito aceptado