



DOI: 10.29298/rmcf.v16i89.1515

Artículo de Investigación

Variación del crecimiento inicial y supervivencia de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz

Variation in initial growth and survival of *Pinus hartwegii* Lindl. from *Cofre de Perote*, state of Veracruz

Héctor Viveros Viveros^{1*}, Jesús Marin Hernández¹, Armando Aparicio Rentería¹, Diana Córdoba Rodríguez², Susana Guillén Rodríguez¹, César Ruiz Montiel¹

Fecha de recepción/Reception date: 14 de agosto de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 15 de abril de 2025.

¹Universidad Veracruzana, Instituto de Investigaciones Forestales, Parque Ecológico "El Haya", México.

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

*Autor por correspondencia; correo-e: heviveros@uv.mx

*Corresponding author; e-mail: heviveros@uv.mx

Resumen

El crecimiento inicial de plantas forestales con amplia distribución altitudinal puede presentar diferencias dependiendo de su origen. *Pinus hartwegii* exhibe esa condición en el Cofre de Perote, Veracruz; por lo que es necesario conocer, si la altitud influye en el crecimiento de la especie. El objetivo del presente estudio fue evaluar en cuatro edades, de manera separada, la variación en diámetro basal, altura y supervivencia de plántulas de *P. hartwegii* en cuatro altitudes en el Cofre de Perote, Veracruz. Se germinaron semillas recolectadas en cuatro altitudes (3 450 a 4 050 m) y se estableció un ensayo en ambiente común. La altura y diámetro basal de las plántulas se evaluó a los 9, 10, 11 y 12 meses de edad, y la supervivencia a los 13 meses. Se obtuvieron diferencias significativas entre altitudes ($P < 0.0001$) para todas las variables en todas las edades. En las primeras edades de evaluación, las plantas de las altitudes extremas (menor y mayor altitud) presentaron las alturas superiores a las de altitud intermedia; en las edades más avanzadas, las plantas de la cota altitudinal menor alcanzaron alturas mayores, y las de la altitud intermedia (3 650 m) registraron la altura más baja. La tendencia del diámetro basal fue similar a la de las alturas de las plántulas en edades avanzadas, mientras que la de la supervivencia fue similar a la de la altura en edades tempranas. La altitud tiene un efecto significativo en el crecimiento de *P. hartwegii* en el Cofre de Perote.

Palabras clave: Altura de planta, Cofre de Perote, diámetro basal, ensayo en ambiente común, gradiente altitudinal, *Pinus hartwegii* Lindl.

Abstract

The initial growth of forest plants with a wide altitudinal distribution may differ depending on their origin. *Pinus hartwegii* has wide altitudinal distribution in the *Cofre de Perote* forest, located at the state of Veracruz, thus, it is necessary to know whether the altitude influences the growth of the species. The objective of this study was to

evaluate at four separate ages the variation in base diameter, initial height and survival of *P. hartwegii* seedlings at four altitudes in the aforementioned place. Seeds collected at four altitudes (3 450-4 050 m) were germinated and a common garden test was established. The height and base diameter of the seedlings were evaluated at 9, 10, 11 and 12 months old, and survival at 13 months. Significant differences between altitudes were obtained ($P < 0.0001$) for all variables at all ages. In the first assessment, the plants at extreme altitudes (the lowest and highest elevation) accomplished the tallest heights compared to those at intermediate elevation; at the oldest ages, the plants at the lowest elevation had the greatest heights, while the plants from the intermediate elevation (3 650 m) had the lowest height. The base diameter trend was similar to seedlings heights at advanced age, while survival was similar to height growth at early ages. Altitude has a significant effect on the growth of the *P. hartwegii* in *Cofre de Perote*.

Key words: Plant height, *Cofre de Perote*, base diameter, common garden test, altitudinal gradient, *Pinus hartwegii* Lindl.

Introducción

El crecimiento de plantas de especies arbóreas forestales procedentes de sitios distribuidos a lo largo de gradientes altitudinales presenta diferencias asociadas con la altitud de origen, como respuesta adaptativa a las condiciones que les impone el ambiente (Skrøppa & Steffenrem, 2019).

Dos tendencias principales del crecimiento en planta forestal se citan en función de la variación altitudinal. En la primera, las plantas originadas de semillas recolectadas en sitios ubicados en el extremo inferior de su distribución altitudinal tienen un crecimiento superior al de aquellas que provienen de semillas de los sitios de mayor altitud, debido a que el crecimiento en estos sitios está limitado por la incidencia de bajas temperaturas (Bresson et al., 2011; Lopez-Toledo et al., 2017; Sáenz-Romero et al., 2006). En la segunda, las plantas originadas de semillas de la parte media de la distribución altitudinal presentan mayor crecimiento que las de semillas provenientes de los extremos de su distribución, porque en las áreas con altitud intermedia predominan condiciones ambientales cercanas al óptimo para las especies; mientras que, en los sitios ubicados a menor altura, las plantas pueden

estar sometidas a estrés hídrico; ya que en estas altitudes se encuentra el límite xérico para la especie.

Para identificar los patrones de variación es necesario realizar mediciones de las plantas con diferente origen altitudinal a temprana edad o en edades más avanzadas, en ensayos de ambiente común, ya sea en vivero o establecidos directamente en campo (Berend *et al.*, 2019). Con esto se pretende que los individuos con diferente origen altitudinal estén expuestos a las mismas condiciones ambientales de crecimiento; de tal manera que, las diferencias que se expresen sean atribuibles al componente genético, más que al ambiental; por lo tanto, serán el resultado de la adaptación a los diferentes ambientes prevalecientes en los sitios de origen (White *et al.*, 2007). Este tipo de estudios permite tomar decisiones correctas en cuanto a la selección de especies y procedencias y también sirven como guías para el movimiento de semillas en programas de reforestación o restauración (Viveros-Viveros & Guillén, 2022).

Pinus hartwegii Lindl. se desarrolla en México y Guatemala (Farjon *et al.*, 1997). En México, está presente en 14 estados, principalmente en el Eje Neovolcánico Transversal (Hernández-Rivera *et al.*, 2020); domina el límite superior de la distribución altitudinal de la vegetación arbórea en México y el mundo, pues se distribuye en altitudes de los 3 000 a los 4 200 m (Musálem & Solís, 2000). Lo anterior la hace una especie clave para estudiar el efecto de la altitud y el cambio climático sobre caracteres reproductivos o adaptativos, ya que algunos estudios indican que el aumento de temperatura afectará a las especies de alta montaña (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2019).

Existen algunos antecedentes sobre la variación altitudinal adaptativa de la altura, diámetro basal, tasa de elongación y peso seco de hojas, ramas y tallo de plántulas a edades diferentes de la especie en el Pico de Tancítaro, Michoacán; en estos, se observó que las plantas procedentes de sitios con menor altitud alcanzaron mayores

alturas y diámetros basales que las de zonas altas (Loya-Rebollar et al., 2013; Viveros-Viveros et al., 2009).

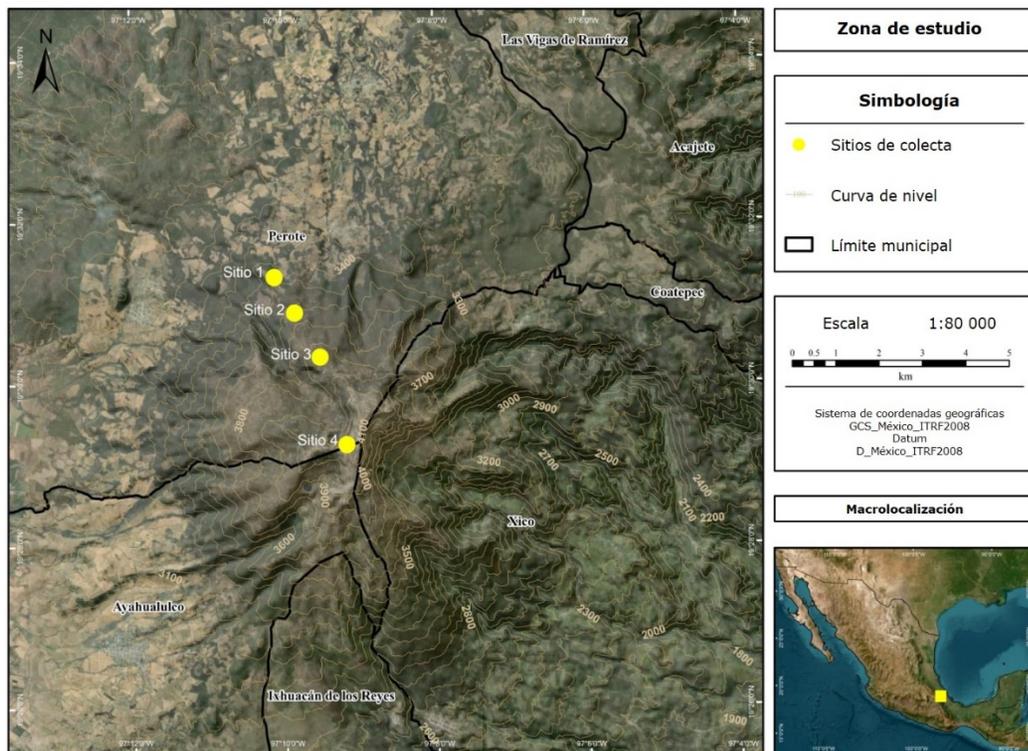
Sin embargo, no existen estudios sobre la variación del crecimiento de *P. hartwegii* en gradientes altitudinales de otras montañas del país, salvo la variación fenotípica de semillas en la Estación Experimental Zoquiapan, Estado de México (López et al., 2023). Con base en todo lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar en cuatro edades, de manera separada, la variación altitudinal del diámetro basal, altura y supervivencia de plántulas de *Pinus hartwegii* originadas de semillas procedentes del Cofre de Perote, Veracruz, México. La hipótesis fue que el crecimiento inicial y la supervivencia de las plántulas variarán con la altitud de origen de los sitios de recolecta. Además, esta variación mostrará la tendencia de que las plantas provenientes de sitios con menor altitud tendrán un mayor crecimiento inicial y supervivencia, que las de las otras altitudes, tanto mayores como intermedias; o bien, que estas últimas tendrán un mayor crecimiento inicial y supervivencia.

Materiales y Métodos

Recolección y beneficio de la semilla

En diciembre de 2014 y enero de 2015 se recolectó semilla de *P. hartwegii* en cuatro sitios ubicados a lo largo de un gradiente altitudinal en el Cofre de Perote, Veracruz, de 3 450 a 4 050 msnm. La separación entre sitios fue de 200 m altitudinales; el último correspondió al límite superior de la vegetación arbórea (Figura 1). En cada

sitio se seleccionaron 15 árboles sin presencia evidente de plagas o enfermedades y con conos; se procuró que estuvieran separados entre sí al menos 50 m, para reducir posibles efectos de endogamia. Se recolectaron 20 conos por árbol, que se trasladaron al Instituto de Investigaciones Forestales de la Universidad Veracruzana, en Xalapa, Veracruz, para el beneficio y almacenamiento de la semilla y el posterior establecimiento del ensayo en vivero. Los conos se pusieron a secar al sol por una semana en un patio con piso de cemento, y la semilla se extrajo en forma manual mediante la disección de conos. Se eliminaron las impurezas y semillas dañadas de forma manual.



W = Oeste. Sitio 1: 3 450 msnm; Sitio 2: 3 650 msnm; Sitio 3: 3 850 msnm;
Sitio 4: 4 050 msnm.

Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de recolecta de semillas de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Cofre de Perote, Veracruz, México.

Establecimiento del ensayo y variables evaluadas

En enero de 2015, se germinaron cuatro repeticiones de 100 semillas por cada sitio altitudinal en bolsas negras de polietileno de 13×20 cm, con capacidad de 1 L. El sustrato que se utilizó estaba compuesto por suelo de bosque y arena de mina en una proporción de 1:1.

Una vez germinada la semilla, las plántulas se acomodaron en el invernadero del Instituto de Investigaciones Forestales de la Universidad Veracruzana, ubicado en el Parque Ecológico El Haya, en la antigua carretera Xalapa-Coatepec en las coordenadas 19°31'12.6" N y 96°56'35.7" O, a una altitud de 1 412 msnm. El diseño experimental fue completamente al azar, con la representación de los cuatro sitios altitudinales (tratamientos), ocho plántulas por línea (unidad experimental) y seis repeticiones de cada tratamiento, para un total de 192 observaciones. En los primeros tres meses, la planta se regó cada tercer día, posteriormente se aplicaron dos riegos semanales.

A cada planta se le midió la altura total (cm) con una regla métrica *Westcott*® H-6560 de 30 cm y el diámetro basal (mm) con un vernier digital *Mitutoyo*® CD-S6"C, a los 9, 10, 11 y 12 meses de edad. A los 13 meses se evaluó el porcentaje de supervivencia de las plántulas mediante el conteo de los individuos muertos y vivos. Con el número de plántulas vivas en cada línea, se estimó el porcentaje de supervivencia por línea con la siguiente fórmula:

$$\text{Supervivencia (\%)} = \left(\frac{\text{Número de plántulas vivas por repetición}}{\text{Número total de plántulas por repetición}} \right) 100 \quad (1)$$

Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se realizaron para cada una de las variables por edad de manera separada. Para determinar, si los datos de la altura total y el diámetro basal evaluados en las cuatro edades antes señaladas, así como la supervivencia cumplían con los principios de normalidad se practicó un análisis de normalidad con la prueba de *Shapiro-Wilk* mediante el procedimiento *UNIVARIATE* del paquete estadístico *SAS* versión 9.4 (Statistical Analysis System [SAS], 2023).

Los datos de las alturas y diámetros basales en las cuatro edades cumplieron con los principios de normalidad ($P \geq 0.1504$). Los correspondientes al porcentaje de supervivencia de la planta no lo hicieron ($P < 0.0001$), por lo que se llevó a cabo un análisis de varianza con modelos lineales generalizados mediante el procedimiento *GENMOD* del paquete estadístico *SAS* versión 9.4 y se siguió la distribución *Poisson* (SAS, 2023).

En el análisis de la varianza de variables que no cumplen con los principios de normalidad, se deben utilizar modelos más potentes al tradicional; tal es el caso de los modelos lineales generalizados. En particular, el procedimiento *GENMOD* de *SAS* permite el ajuste de variables que no tienen distribución normal (Bandera & Pérez, 2018). Para los datos de las alturas y de los diámetros basales en las cuatro edades, el análisis de varianza se hizo por el procedimiento *GLM* del paquete estadístico *SAS* versión 9.4 y la comparación múltiple de medias mediante la prueba *Tukey*. Para determinar la contribución de los sitios a la varianza, se utilizó el procedimiento *VARCOMP*, opción *REML* (SAS, 2023). El modelo estadístico que se utilizó fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + X_i + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Donde:

Y_{ij} = Valor de la j -ésima observación en la i -ésima altitud

μ = Media general

X_i = i -ésima altitud (m)

ε_{ij} = Error experimental

Resultados y Discusión

Diferenciación en la altura inicial

Existieron diferencias significativas ($P < 0.0001$) en la altura total de las plántulas entre los sitios de origen de las semillas de *P. hartwegii* en las cuatro edades evaluadas (Cuadro 1). Esto fue congruente con la altura total a los 7 y 18 meses de edad en plantas de la misma especie de sitios ubicados en un gradiente altitudinal en el Pico de Tancítaro, Michoacán (Viveros-Viveros et al., 2009). Resultados similares se describen en otras especies de pino con distribución en gradientes altitudinales; por ejemplo, Viveros-Viveros et al. (2005) determinaron diferencias entre sitios altitudinales para la altura total a los 15 y 24 meses de edad en plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. plantadas en dos localidades de los bosques de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. De igual manera, Ruiz-Talonia et al. (2014) registraron

diferencias entre sitios altitudinales para la altura de la plántula a los 18 y 24 meses de edad, en *Pinus patula* Schltdl. & Cham. plantada en dos sitios en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Lo anterior demuestra la importancia de la altitud en la adaptación local para *P. hartwegii* y otras especies de pino con distribución en gradientes de este tipo (Martínez-Berdeja *et al.*, 2019).

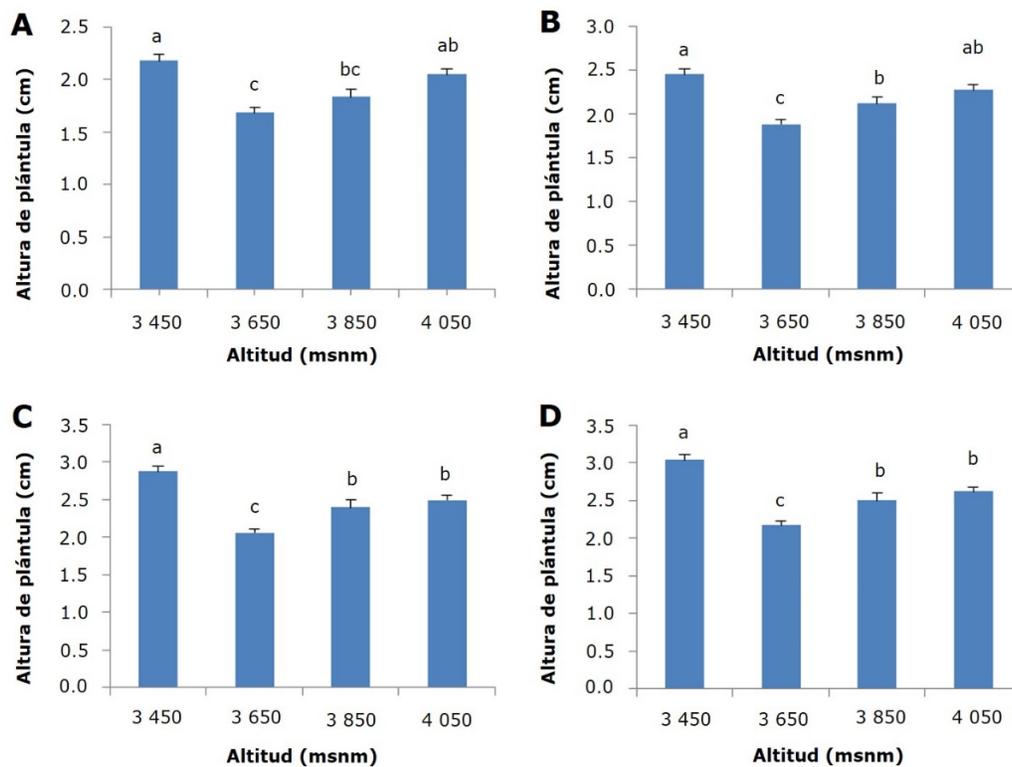
Cuadro 1. Nivel de significancia (*P*) del análisis de varianza y porcentaje de contribución a la varianza total de la altura de las plántulas de *Pinus hartwegii* Lindl. procedentes de cuatro sitios altitudinales del Cofre de Perote, Veracruz, México, evaluada en cuatro edades.

Fuente de variación	9 meses		10 meses		11 meses		12 meses	
	<i>P</i>	%	<i>P</i>	%	<i>P</i>	%	<i>P</i>	%
Sitio	<0.0001	18.62	<0.0001	21.16	<0.0001	29.89	<0.0001	30.18
Error	-----	81.38	-----	78.84	-----	70.11	-----	69.82

La contribución de los sitios ubicados en diferentes pisos altitudinales a la varianza total, para la altura total de las plántulas de *P. hartwegii* varió de 18.6 a 30 %, aproximadamente, y aumentó con la edad (Cuadro 1). Fue mayor a la referida en la altura de plántulas de *Pinus patula*, *P. leiophylla* Schiede *ex* Schltdl. & Cham. y *P. pseudostrobus* (<10 %). En particular, la contribución a los 12 meses de edad fue similar a lo registrado en *Pinus devoniana* Lindl. (39 %) (Castellanos-Acuña *et al.*, 2013; Ruiz-Talonia *et al.*, 2014). Esto indica que en *P. hartwegii* las altitudes contribuyen significativamente en la diferenciación genética de las poblaciones para la altura de las plantas (Viveros-Viveros *et al.*, 2009).

Las plántulas de *P. hartwegii* de sitios con altitudes extremas (menor y mayor) presentaron mayores alturas promedio a los 9 (2.176 cm y 2.047 cm, respectivamente) y 10 meses (2.449 cm y 2.268 cm, respectivamente) de edad; mientras que los sitios con altitud intermedia alcanzaron las alturas más bajas (Figura 2A y 2B). A partir de los 11 meses de edad, las plántulas del sitio de menor altitud (3

450 msnm) tuvieron una altura significativamente superior (2.871 cm a los 11 meses y 2.490 cm a los 12 meses) (Figura 2C y 2D) a los otros sitios; por el contrario, las del sitio ubicado a 3 650 msnm (intermedio) registraron la altura significativamente inferior (2.063 cm a los 11 meses y 2.173 cm a los 12 meses), lo mismo que a la edad de 9 y 10 meses. A los 11 y 12 meses, los ejemplares de los sitios de 3 850 y 4 050 msnm no se diferenciaron entre sí en altura, y fueron intermedias a las de los sitios de 3 450 y 3 650 msnm (Figura 2A, 2B, 2C y 2D).



A = 9 meses; B = 10 meses; C = 11 meses; D = 12 meses. La barra vertical representa el error estándar y las letras diferentes indican diferencias significativas entre altitudes ($P < 0.05$).

Figura 2. Promedios de la altura total de plántulas de *Pinus hartwegii* Lindl. procedentes de cuatro altitudes del Cofre de Perote, Veracruz, México, a diferentes edades.

La tendencia de la variación altitudinal de la altura a los 9 y 10 meses de edad no fue la esperada; con base en los resultados obtenidos en otras especies forestales en gradientes altitudinales, se suponía que las plantas de sitios con menor altitud serían más altas que las de los sitios de mayor altitud, como lo ocurrido con *P. hartwegii* en el Pico de Tancítaro, Michoacán (Viveros-Viveros *et al.*, 2009) y en *P. devoniana* (Castellanos-Acuña *et al.*, 2013). Otra posibilidad era que las procedencias de sitios ubicados en la parte media de la distribución altitudinal, tuvieran alturas superiores a las de las plantas procedentes de sitios con menor y mayor altitud, como en el caso de *Pinus oocarpa* Schiede *ex* Schltdl. (Sáenz-Romero *et al.*, 2006). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis inicialmente planteada respecto a la tendencia que se esperaba para la variación altitudinal de la altura de *P. hartwegii* en el Cofre de Perote, Veracruz.

Una tendencia similar a la que se observó a los 9 y 10 meses de edad se cita para la supervivencia, altura y diámetro basal evaluados a los 18 meses de edad, así como en la altura a los 4 años de edad en *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. (Cruzado-Vargas *et al.*, 2020; Herrejón-Calderón *et al.*, 2022). La tendencia para la altura a los 9 y 10 meses de edad se explica, probablemente, porque las plantas procedentes de sitios ubicados en altitudes mayores están adaptadas a iniciar su crecimiento en cuanto detectan condiciones favorables de temperatura y humedad; al moverse estas plantas a sitios por debajo de su altitud de origen (en donde existen condiciones ambientales más favorables para su crecimiento), la tasa de crecimiento es más destacada y el periodo se amplía (Vitasse *et al.*, 2013), lo que les permite igualar el crecimiento de las plantas del sitio de menor altitud e incluso superar a las plantas de sitios intermedios (al menos en la etapa inicial); sin embargo, en edades posteriores, las plantas de menor altitud evidencian un mayor potencial de crecimiento, lo cual es congruente con lo registrado para *P. hartwegii* (Viveros-Viveros *et al.*, 2009) y *P. devoniana* (Castellanos-Acuña *et al.*, 2013).

Otra posibilidad es que la tendencia que se advirtió en las dos primeras edades de evaluación (9 y 10 meses de edad) sea el resultado de efectos maternos (Vivas et al., 2015).

Diferenciación en el crecimiento en diámetro basal

El diámetro basal de las plántulas mostró diferencias significativas ($P < 0.0001$) entre los sitios de origen de las semillas en las cuatro edades evaluadas (Cuadro 2). Lo anterior fue congruente con las diferencias entre sitios ubicados a lo largo de gradientes altitudinales para el diámetro basal en *P. hartwegii* a los 5.5 años de edad en el Pico de Tancítaro, Michoacán (Loya-Rebollar et al., 2013) y en plantas de *P. pseudostrobus* a los 24 meses de edad plantadas en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán (Viveros-Viveros et al., 2006).

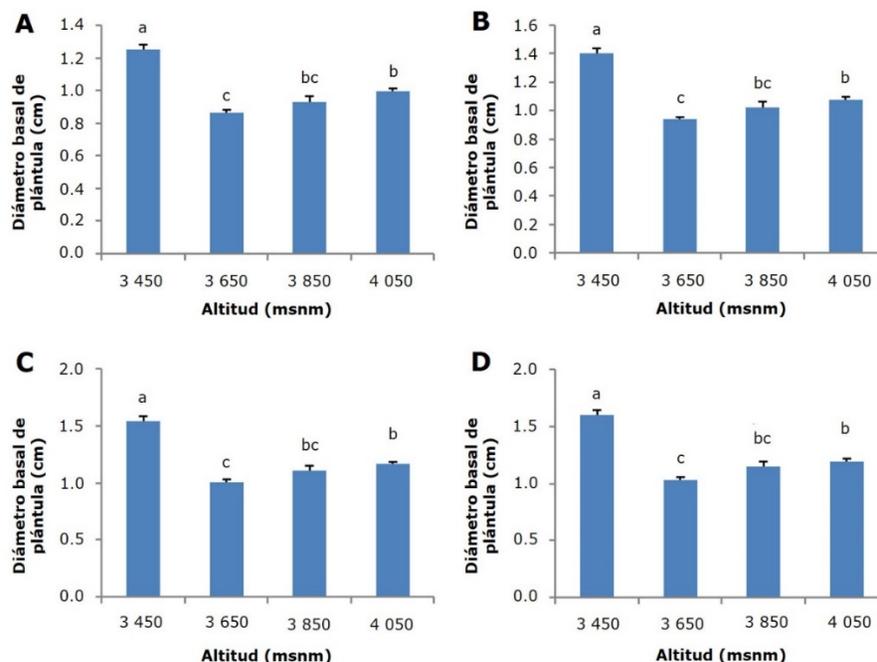
Cuadro 2. Nivel de significancia (P) del análisis de varianza y porcentaje de contribución del sitio a la varianza total en diámetro basal de plántulas de *Pinus hartwegii* Lindl. procedentes de cuatro sitios altitudinales del Cofre de Perote, Veracruz, México, evaluadas en cuatro edades.

Fuente de variación	9 meses		10 meses		11 meses		12 meses	
	P	%	P	%	P	%	P	%
Sitio	<0.0001	45.99	<0.0001	47.56	<0.0001	47.48	<0.0001	45.79
Error	-----	54.01	-----	52.44	-----	52.52	-----	54.21

La contribución de los sitios altitudinales a la varianza total del crecimiento en diámetro basal fue alta (>45 %) (Cuadro 2) y superior al diámetro basal de plantas

de *P. hartwegii* en Michoacán (23 %) (Loya-Rebollar *et al.*, 2013). Esto indica que en dicha especie las altitudes contribuyen de forma importante en la diferenciación genética de las poblaciones para el diámetro basal y es mayor a la que ocurre en la altura de las plantas (Viveros-Viveros *et al.*, 2009).

Las plantas del sitio de menor altitud se distinguieron por sus diámetros basales más destacados en todas las edades evaluadas (Figura 3A, 3B, 3C y 3D), mientras que las del sitio intermedio (3 650 msnm) registraron el valor más bajo en todas las edades (Figura 3A, 3B, 3C y 3D); las plantas de los sitios de 4 050 y 3 850 msnm presentaron las alturas intermedias, aunque estas últimas no se diferenciaron del sitio de 3 650 msnm. Lo anterior se debe a que las plantas procedentes de una altitud inferior, como parte de su adaptación a sitios donde las bajas temperaturas son menos limitantes, tienden a desarrollar un mayor crecimiento en el diámetro basal (Bresson *et al.*, 2011; Viveros-Viveros *et al.*, 2009). Por ello, en este caso, se acepta la hipótesis inicialmente planeada de que se espera un mayor crecimiento en diámetro basal en las plantas de la procedencia de menor altitud.



A = 9 meses; B = 10 meses; C = 11 meses; D = 12 meses. La barra vertical representa el error estándar y las letras diferentes indican diferencias significativas entre altitudes ($P < 0.05$).

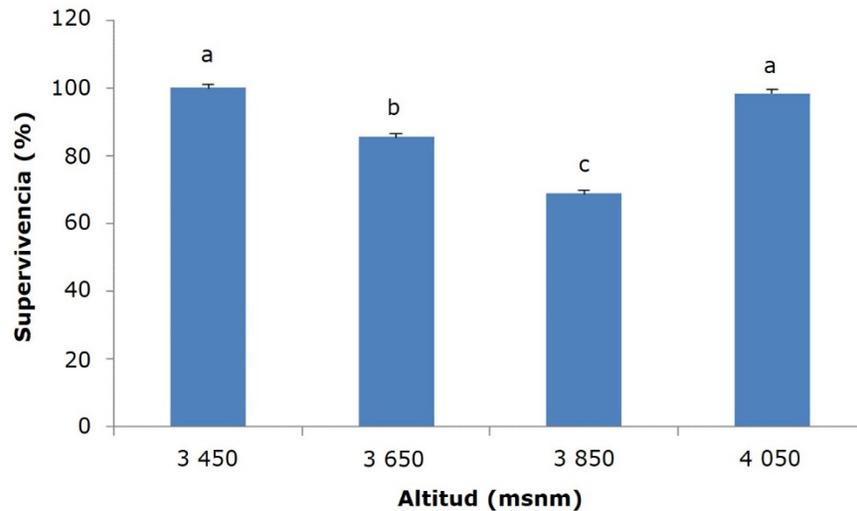
Figura 3. Promedios del diámetro basal de las plántulas de *Pinus hartwegii* Lindl. procedentes de cuatro altitudes del Cofre de Perote, Veracruz, a diferentes edades.

Diferenciación en la supervivencia de plantas

La supervivencia de las plántulas de *P. hartwegii* tuvo diferencias significativas ($P < 0.0001$) entre los sitios de origen de la semilla. Asimismo, el porcentaje de contribución de los sitios a la varianza total fue elevado (75 %) a los 13 meses de edad, además esta fue a la que los sitios altitudinales tuvieron un mayor aporte a la varianza total. De manera similar, la supervivencia de plantas de *A. religiosa* (a los 18 meses de edad) también registró diferencias entre sitios ubicados en un gradiente altitudinal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en el Estado de México (Cruzado-Vargas et al., 2020).

La tendencia de la variación de la supervivencia fue similar a la de la altura total de las plántulas a los 9 y 10 meses; es decir, las plantas procedentes de los sitios con altitudes extremas (menor y mayor) se distinguieron por presentar una supervivencia superior, en tanto que las poblaciones intermedias tuvieron la más baja (Figura 4). Aunque no es tan común verificar esta tendencia, se confirma para ejemplares de *A. religiosa* procedente de un gradiente altitudinal (2 960 a 3 450 msnm) en la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca en el Estado de México (Cruzado-Vargas et al., 2020) y quizás obedezca a que las plantas del sitio con menor altitud están mejor adaptadas a condiciones ambientales más benignas, particularmente en temperatura

y precipitación; mientras que las plantas procedentes de semillas del sitio con mayor altitud presentan una respuesta adaptativa positiva ante las mejores condiciones ambientales imperantes al ser movidas muy por debajo de su distribución altitudinal natural, al menos de manera temporal (Vitasse *et al.*, 2013).



La barra vertical representa el error estándar y las letras diferentes indican diferencias significativas entre altitudes ($P < 0.05$).

Figura 4. Supervivencia promedio de plántulas de *Pinus hartwegii* Lindl. a los 13 meses de edad procedentes de cuatro altitudes del Cofre de Perote, Veracruz, México.

Conclusiones

La altitud es una fuerte influencia en la variación de la supervivencia y crecimiento inicial de *Pinus hartwegii* del Cofre de Perote. Para la altura, la respuesta es diferencial según la edad de las plantas; en un principio, los ejemplares de altitudes extremas

tienen mejor desempeño, pero a mayor edad, las de sitios con menor altitud tienen mejor respuesta. Para el diámetro basal y la supervivencia, el efecto de la altitud se mantiene con la edad de las plantas; las de menor altitud presentan mayor crecimiento de diámetro basal, y las de altitudes extremas registran cifras superiores de supervivencia.

Agradecimientos

Los autores desean dejar de manifiesto su reconocimiento al Instituto de Investigaciones Forestales de la Universidad Veracruzana por el apoyo para el desarrollo del proyecto.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribución por autor

Héctor Viveros Viveros: planeación y supervisión del experimento, análisis estadístico y redacción del documento; Jesús Marin Hernández: conducción del experimento y redacción del documento; Armando Aparicio Renteria: supervisión del experimento y revisión del documento; Diana Córdoba Rodríguez, Susana Guillén Rodríguez y César Ruiz Montiel: revisión del documento.

Referencias

- Astudillo-Sánchez, C. C., Fowler, M. S., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., & Soria-Díaz, L. (2019). Recruitment and facilitation in *Pinus hartwegii*, a Mexican alpine treeline ecotone, with potential responses to climate warming. *Trees*, *33*, 1087-1100. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01844-3>
- Bandera F., E., y Pérez P., L. (2018). Los modelos lineales generalizados mixtos. Su aplicación en el mejoramiento de plantas. *Cultivos Tropicales*, *39*(1), 127-133. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v39n1/ctr19118.pdf>
- Berend, K., Haynes, K., & MacKenzie, C. M. (2019). Common garden experiments as a dynamic tool for ecological studies of alpine plants and communities in Northeastern North America. *Rhodora*, *121*(987), 174-212. <https://doi.org/10.3119/18-16>
- Bresson, C. C., Vitasse, Y., Kremer, A., & Delzon, S. (2011). To what extent is altitudinal variation of functional traits driven by genetic adaptation in European oak and beech? *Tree Physiology*, *31*(11), 1164-1174. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr084>
- Castellanos-Acuña, D., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Sánchez-Vargas, N. M., Lobbit, P., y Montero-Castro, J. C. (2013). Variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. Ensayo de vivero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *19*(3), 399-411. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.01.002>
- Cruzado-Vargas, A. L., Zamudio-Sánchez, F. J., Rodríguez-Yam, G. A., Carbajal-Navarro, A. L., Blanco-García, J. A., & Sáenz-Romero, C. (2020). Growth of naturally regenerated *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham. seedlings in a nursery and genetic variation among provenances. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *26*(1), 85-96. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.013>

- Farjon, A., Pérez de la Rosa, J. A., y Styles, T. B. (1997). *Guía de campo de los pinos de México y América Central*. Royal Botanic Gardens. <https://kew.iro.bl.uk/concern/books/d56e6152-77e9-417d-aeff-64b751ca31cd>
- Hernández-Rivera, J., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., González-Flores, G., Goche-Telles, J. R., Prieto-Ruíz, J. A., y Pérez-Hernández, J. F. (2020). Regeneración natural de *Pinus hartwegii* Lindl. en base al gradiente altitudinal en el ejido Malila, Hidalgo. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 7(2), 12-18. <https://www.reibci.org/publicados/2020/oct/4000108.pdf>
- Herrejón-Calderón, P., Cruzado-Vargas, A. L., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R., Endara-Agramont, Á. R., López-Toledo, L., y Sáenz-Romero, C. (2022). Patrones de variación genética altitudinal entre procedencias de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham. en etapa de vivero. *Biológicas*, 21(1), 25-33. <https://www.biologicas.umich.mx/index.php?journal=biologicas&page=article&op=view&path%5B%5D=295&path%5B%5D=444528>
- López L., A., Palacios R., M. I., Sáenz R., C., Villanueva M., A., y Pacheco A., V. (2023). Variación clinal de caracteres fenotípicos y fisiológicos en *Pinus hartwegii* Lindl. para la estación forestal experimental Zoquiapan, México. *Polibotánica*, (56), 61-79. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.56.4>
- Lopez-Toledo, L., Heredia-Hernández, M., Castellanos-Acuña, D., Blanco-García, A., & Sáenz-Romero, C. (2017). Reproductive investment of *Pinus pseudostrobus* along an altitudinal gradient in Western Mexico: implications of climate change. *New Forests*, 48, 867-881. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9602-8>
- Loya-Rebollar, E., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Lobit, P., Villegas-Moreno, J. A., & Sánchez-Vargas, N. M. (2013). Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 62(3), 86-95. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0011>
- Martínez-Berdeja, A., Hamilton, J. A., Bontemps, A., Schmitt, J., & Wright, J. W. (2019). Evidence for population differentiation among Jeffrey and Ponderosa pines in

- survival, growth and phenology. *Forest Ecology and Management*, 434, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.009>
- Musálem S., M. A., y Solís P., M. A. (2000). *Monografía de Pinus hartwegii* (Libro Técnico No. 3). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Centro.
- Ruiz-Talonia, L. F., Sánchez-Vargas, N. M., Bayuelo-Jiménez, J. S., Lara-Cabrera, S. I., & Sáenz-Romero, C. (2014). Altitudinal genetic variation among native *Pinus patula* provenances: performance in two locations, seed zone delineation and adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 63(4), 139-149. <https://doi.org/10.1515/sg-2014-0019>
- Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna, R. R., & Rehfeldt, G. E. (2006). Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico: Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management*, 229(1-3), 340-350. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.014>
- Skrøppa, T., & Steffenrem, A. (2019). Genetic variation in phenology and growth among and within Norway spruce populations from two altitudinal transects in Mid-Norway. *Silva Fennica*, 53(1), Article 10076. <https://doi.org/10.14214/sf.10076>
- Statistical Analysis System. (2023, January 31). The SAS system for windows, release (V. 9.4) [Software]. SAS Institute Inc. <https://support.sas.com/software/94/#:~:text=SAS%209.4%20delivers%20a%20highly,documentation%20and%20review%20new%20capabilities>
- Vitasse, Y., Hoch, G., Randin, C. F., Lenz, A., Kollas, C., Scheepens, J. F., & Körner, C. (2013). Elevational adaptation and plasticity in seedling phenology of temperate deciduous tree species. *Oecologia*, 171, 663-678. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2580-9>
- Vivas, M., Kemler, M., & Slippers, B. (2015). Maternal effects on tree phenotypes: considering the microbiome. *Trends in Plants Science*, 20(9), 541-544. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.06.002>

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., López-Upton, J., y Vargas-Hernández, J. J. (2005). Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en campo. *Agrociencia*, 39, 575-587. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/421/421>

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 836-842. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., y López-Upton, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), 121-126. <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/1485>

Viveros-Viveros, H., y Guillén R., S. (2022). Variación morfológica adaptativa de plantas forestales en gradientes altitudinales. En S. Guillén R., B. del S. Bolívar C. & E. A. Díaz Á. (Coords.), *La investigación forestal en tiempos de cambio global: problemáticas y perspectivas* (pp. 31-43). Universidad Veracruzana. <https://doi.org/10.25009/uv.2864.1701>

White, T. L., Adams, W. T., & Neale, D. B. (2007). *Forest Genetics*. Centre for Agriculture and Bioscience International. <https://doi.org/10.1079/9781845932855.0000>



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.