



Crecimiento y calidad de fuste de procedencias del pino prieto austral en Metepec, Estado de México

Growth and stem quality of Southern black pine provenances in Metepec, State of Mexico

Gabriel Martínez Cantera¹, Mario Valerio Velasco García^{2*}, María Ascención Aguilar Morales³

Fecha de recepción/Reception date: 16 de junio de 2025
Fecha de aceptación/Acceptance date: 2 de septiembre del 2025

¹Programa de Mejoramiento Genético Forestal. Protectora de Bosques del Estado de México (Probosque). México.

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, INIFAP. México.

³Estancia Posdoctoral Secihti. Centro Universitario Tenancingo, Universidad Autónoma del Estado de México. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: velasco.mario@inifap.gob.mx

*Corresponding author; e-mail: velasco.mario@inifap.gob.mx

Resumen

En México, el pino prieto austral (*Pinus greggii* var. *australis*) se usa ampliamente para plantaciones maderables y reforestaciones, pero es necesario evaluar su desempeño en sitios específicos para elegir los mejores genotipos. El objetivo de la presente investigación fue determinar las diferencias entre procedencias en función del crecimiento y calidad de fuste, así como evaluar su relación con variables ambientales. El estudio se realizó en un ensayo de ocho procedencias de pino prieto establecido en Metepec, Estado de México. Todas las variables tuvieron diferencias entre procedencias ($p \leq 0.0002$), excepto el ángulo y diámetro de ramas ($p \geq 0.3558$). Las procedencias El Madroño, El Cobre y El Pinalito registraron la supervivencia más alta (69.57 a 79.54 %). La Parada, El Madroño, El Pinalito, El Cobre y La Cebada alcanzaron mayor volumen (115.1 a 134.6 dm³), incremento periódico anual de diámetro normal (1.83 a 2.14 cm) y de altura (0.80 a 0.84 m). La Parada, Molango, El Madroño y La Cebada tuvieron los fustes más rectos; mientras que El Cobre, El Piñón y Ponthadó presentaron menores unidades de crecimiento y número de ramas. Las variables de crecimiento se correlacionaron con la latitud ($r \geq 0.711$, $p \leq 0.048$); las unidades de crecimiento y rectitud de fuste con la precipitación ($r \geq 0.761$, $p \leq 0.028$) y el diámetro de ramas con la latitud y altitud ($r \geq 0.714$, $p \leq 0.047$). El Madroño se recomienda tanto para reforestación, como para plantaciones maderables debido a su alta supervivencia, crecimiento y calidad de fuste.

Palabras clave: Correlación, incremento periódico anual, latitud, *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & Lopez Upton, rectitud de fuste, supervivencia.

Abstract

In Mexico, the Southern black pine (*Pinus greggii* var. *australis*) is widely used for timber plantations and reforestation, but it is necessary to assess its performance at specific sites in order to select superior genotypes. The objective of this research study was to determine differences among provenances in terms of growth and stem quality, as well as to evaluate their relationship with environmental variables. The assessment was conducted in a provenance trial of eight sources of Southern black pine, established in Metepec, State of Mexico. All variables showed significant differences among provenances ($p \leq 0.0002$), except for branch angle and diameter ($p \geq 0.3558$). The provenances *El Madroño*, *El Cobre* and *El Pinalito* exhibited the highest survival rates (69.57 to 79.54 %). *La Parada*, *El Madroño*, *El Pinalito*, *El Cobre* and *La Cebada* showed higher stem volume (115.1 to 134.6 dm³), periodic annual increment in diameter at breast height (1.83 to 2.14 cm), and in height (0.80 to 0.84 m). *La Parada*, *Molango*, *El Madroño* and *La Cebada* produced the straightest stems, whereas *El Cobre*, *El Piñón* and *Ponchadó* showed fewer growth units and branches. Growth variables were positively correlated with latitude ($r \geq 0.711$, $p \leq 0.048$), while the number of growth units and stem straightness were correlated with precipitation ($r \geq 0.761$, $p \leq 0.028$) and branch diameter was correlated with latitude and altitude ($r \geq 0.714$, $p \leq 0.047$). *El Madroño* is recommended for both reforestation and timber plantations due to its high survival, growth performance, and stem quality.

Key words: *Agave angustifolia* Haw., species association, native tree species, Cultural Importance Index, prioritization of species, productive restoration.

Introducción

Los bosques son importantes para el desarrollo sostenible porque ofrecen múltiples bienes y servicios ecosistémicos (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2020; Pérez et al., 2008). A nivel global, nacional y local, los bosques están bajo presión por factores de estrés relacionados con el cambio climático, factores antropogénicos y por el aumento de la demanda de productos forestales; por lo que es necesario desarrollar acciones para proteger, conservar, restaurar y utilizar de manera sustentable los recursos forestales (FAO, 2024).

Entre las alternativas para reducir la presión sobre los bosques naturales está el establecimiento de plantaciones forestales productivas y de protección (Carle & Holmgren, 2009; Carle et al., 2020). En México, desde 1970 se establecen reforestaciones en ejidos y comunidades con apoyos gubernamentales, con bajos niveles de supervivencia (44 a 48 %) (Burney et al., 2015). Asimismo, el gobierno

federal impulsó las plantaciones forestales comerciales entre 1997 y 2008, pues se establecieron 117 479 ha, con crecimiento promedio de $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Velázquez-Martínez et al., 2013). En el país, los esfuerzos en reforestaciones y plantaciones comerciales enfrentan múltiples desafíos, entre ellos: aumentar la adaptación y la productividad, así como disminuir la mortalidad y el efecto del cambio climático (Burney et al., 2015; Velázquez-Martínez et al., 2013).

En México, el germoplasma que se usa es de baja calidad genética (Burney et al., 2015; Velázquez-Martínez et al., 2013). Por lo tanto, en los programas de reforestación y plantaciones comerciales, el mejoramiento genético forestal (MGF) como innovación tecnológica es esencial para afrontar los desafíos antes citados (FAO, 2024). A través del MGF se seleccionan procedencias y familias, y se desarrollan variedades y clones para aumentar la productividad, mejorar la adaptación e incrementar la tolerancia a plagas y enfermedades (Sánchez-Rosales et al., 2025; White et al., 2007; Zobel & Talbert, 1988). Para establecer plantaciones es necesario seleccionar especies y procedencias que toleren las condiciones de los sitios específicos (Sánchez-Rosales et al., 2025; Zobel & Talbert, 1988).

En el gobierno del Estado de México, a través de la empresa Protectora de Bosques (Probosque), entre 2012 y 2023 se financiaron 16 398.86 ha de plantaciones forestales (Protectora de Bosques del Estado de México [Probosque], 2024). Entre 1990 y 2002, esta entidad productiva inició programas de MGF mediante el establecimiento de 26 rodales semilleros, 15 áreas semilleras, 28 huertos semilleros sexuales y dos huertos semilleros asexuales; así como múltiples ensayos de procedencias y progenies con especies potenciales para la reforestación y plantaciones comerciales (Azamar-Oviedo et al., 2000; Rojas-Vergara, 2023).

Una de las especies incluidas en los planes de MGF para el Estado de México fue *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., que mostró buena adaptación y crecimiento en la

región (Azamar-Oviedo et al., 2000). Esta especie crece rápido y su madera se utiliza en la industria de aserrío, por lo que es muy utilizada en plantaciones comerciales y en reforestaciones para la recuperación de suelos degradados (Gómez-Romero et al., 2012; Vásquez-García et al., 2016).

De acuerdo a lo anterior, *P. greggii* es la segunda especie más producida en los viveros forestales de México, ya que 10 % de la producción nacional (Burney et al., 2015). Sus dos variedades: var. *greggii* y var. *australis* se han plantado fuera de su distribución natural, donde sus procedencias muestran respuesta diferencial respecto a supervivencia, crecimiento y adaptación (Valencia-Manzo et al., 2006). Por ello, en el Estado de México se establecieron ensayos de procedencias y progenies para evaluar el desempeño de *P. greggii* en la región de Metepec y Almoloya de Juárez. De esos ensayos, solo uno se evaluó y convirtió en huerto semillero sexual (Azamar-Oviedo et al., 2000). En el caso de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & Lopez Upton se estableció un ensayo en agosto de 2012 en el Parque Ambiental Bicentenario en Metepec, Estado de México.

En este contexto, el objetivo del presente estudio consistió en determinar las diferencias entre procedencias de *Pinus greggii* var. *australis* en cuanto a la supervivencia, características de crecimiento y calidad de fuste, así como evaluar la relación de estas características con factores geográficos y ambientales. Se planteó la hipótesis de que el crecimiento y la calidad del fuste serán diferentes entre las procedencias debido a variaciones genéticas y a la influencia de factores ambientales y geográficos del origen. En forma complementaria, se aporta una discusión sobre el uso de las procedencias en la región de Metepec, Estado de México, México.

Materiales y Métodos

Origen de las semillas y establecimiento del ensayo

El ensayo se estableció con ocho procedencias; la semilla de dos de ellas se recolectó en árboles selectos ubicados en rodales naturales; mientras que, la fuente de semillas del resto de las procedencias fue el huerto semillero asexual de *Pinus greggii* var. *australis*, localizado junto a los invernaderos de Probosque (19°14'27.9" N, 99°35'06.1" O, 2 600 msnm) en el municipio Metepec, Estado de México (Cuadro 1). La planta se produjo en el vivero forestal del Colegio de Postgrados *Campus Montecillo*, con sustrato de *peat moss* (50 %), agrolita (25 %) y vermiculita (25 %). Se aplicó un kilogramo de *Multicote*™ por cada metro cúbico de sustrato. La planta tenía seis meses de edad al momento de la plantación.

Cuadro 1. Características geográficas y ambientales de las procedencias evaluadas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & Lopez Upton.

Procedencia	Municipio, Estado	Latitud (N)	Longitud (O)	Altitud (m)	TMA (°C)	PMA (mm)	pH
Ponchadó	Metztitlán, Hgo.	20°28'59.4"	98°53'59.3"	2 386	18	750	6.5
La Cebada	Zimapán, Hgo.	20°54'1.97"	99°11'54.5"	2 347	18	850	6.5
Molango*	Molango, Hgo.	20°46'33.1"	98°43'18.9"	1 850	21	900	6.7
El Cobre*	Jacala, Hgo.	21°02'39.8"	99°09'43.9"	1 840	20	700	6.2
El Madroño*	LDM, Qro.	21°16'59.5"	99°08'25.5"	1 745	20	850	6.3
El Pinalito*	Jacala, Hgo.	21°01'43.0"	99°09'35.8"	1 735	20	700	6.5
El Piñón*	Jacala, Hgo.	21°02'47.6"	99°10'32.4"	1 700	20	650	6.2
La Parada*	LDM, Qro.	21°15'36.1"	99°10'14.8"	1 638	20	850	6.3

*Fuente: Huerto semillero Metepec. TMA = Temperatura media anual; PMA = Precipitación media anual. Hgo. = Hidalgo; Qro. = Querétaro; LDM= Landa de Matamoros.

El ensayo de procedencias se plantó en agosto de 2012, en el Parque Ambiental Bicentenario ($19^{\circ}14'47.90''$ N, $99^{\circ}35'26.20''$ O, 2 607 msnm) del Conjunto Sedagro, Metepec, Estado de México, México. La precipitación media anual es de 800 mm, temperatura media anual de 12.7°C , de 100 a 120 días con heladas al año (Azamar-Oviedo *et al.*, 2000).

El manto freático es superficial y la textura del suelo es franco-arenosa (arena 57.84 %, limo 22.72 %, arcilla 19.44 %) con profundidad de 1.20 m (Azamar-Oviedo *et al.*, 2000). Previa a la plantación (abril de 2012), el subsoleo del terreno (rompimiento de la capa superficial) se realizó a cada 3 m con maquinaria pesada D7; posteriormente, los terrones se desmoronaron y el terreno se emparejó con la rastra de un tractor agrícola.

Espaciamiento y diseño experimental

La plantación se realizó en cepa común de 30×30 cm mediante un diseño marco real con separación de 3 m entre plantas. El diseño experimental fue de bloques (23) completos al azar, con unidades experimentales de una planta por familia (60) correspondientes a ocho procedencias. En total se plantaron 1 238 plantas sujetas a evaluación, además de una línea de plantas alrededor del experimento para eliminar el efecto de borde (Valencia-Manzo *et al.*, 2006).

Medición de variables de crecimiento

La primera medición de la altura se hizo a principios de 2013, después del primer periodo de crecimiento; mientras que la primera medición del diámetro normal (a 1.30 m de altura) se efectuó a principios de 2019, cuando todos los árboles superaron la altura de 1.30 m. La altura y el diámetro normal se midieron con un flexómetro *Cadena® MGA 725* y vernier digital *Miltutoyo® IP67 ABSOLUTE*, respectivamente. La segunda medición de ambas variables se llevó a cabo a principios de 2023, 10.5 años después del establecimiento del ensayo. El diámetro normal se determinó con una forcípula *Haglöf® Mantax Blue* de 400 mm y la altura con un hipsómetro *Haga® W-Germany*. Con los datos de la primera y segunda evaluación se calculó el Incremento periódico Anual de Altura (*IPAA*) y de diámetro normal (*IPADN*) con la siguiente ecuación (Imaña & Encinas, 2008):

$$IPA = \frac{\text{Segunda medición} - \text{Primera medición}}{\text{Años entre la primera y la segunda medición}} \quad (1)$$

Con los datos de diámetro normal (*DN*) y altura (*A*) de 2023 se calculó el volumen (*V*) de los árboles mediante la ecuación de *Schumacher y Hall* (Muñoz-Flores et al., 2012):

$$V = 0.00013794(DN)^{1.671395792}(A)^{0.916603698} \quad (2)$$

A principios de 2019, se midió el diámetro de copa con un longímetro *Truper*® TP50ME, además se definieron variables de calidad de fuste como número de unidades de crecimiento, rectitud de fuste, número, diámetro y ángulo de ramas. La rectitud del fuste se valoró cualitativamente: 1 (muy chueco o torcido), 2 (moderadamente chueco o torcido), 3 (ligeramente chueco o torcido) y 4 (recto). El diámetro y ángulo de ramas se registraron en todas las ramas presentes en el primer verticilo de cada árbol y después se calculó el promedio. El diámetro de las ramas se obtuvo con un vernier *Pretul*® *VER-6PX* y el ángulo con un transportador de 180° *Faber Castell*® 01697.

Análisis de datos

Previo al análisis, se comprobó el supuesto de normalidad y homogeneidad de varianzas con la prueba de *Shapiro-Wilk* y *Levene*, respectivamente. Todas las variables no cumplieron con ambos supuestos ($p \leq 0.0196$), excepto el número de ramas ($p \geq 0.165$); por lo que se analizó con un ANOVA paramétrico y comparaciones de medias de *Tukey*; el resto de las variables se analizaron con pruebas no paramétricas RT4 y comparaciones múltiples de rangos (Conover, 2012). El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + P_j + BP_{ij} + F_{k(j)} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

Donde:

Y_{ijk} = Valor observado del árbol de la k -ésima familia anidada en la j -ésima procedencia en el i -ésimo bloque

μ = Valor medio de la población

β_i = Efecto del i -ésimo bloque

P_j = Efecto de la j -ésima procedencia

BP_{ij} = Efecto de la interacción bloque por procedencia

$F_{k(j)}$ = Efecto de la k -ésima familia anidada en la procedencia

ε_{ijk} = Error aleatorio

Para conocer las mejores procedencias en función del conjunto de variables, se aplicó un análisis de componentes principales para las variables de crecimiento, y otro análisis con las variables de calidad de fuste que presentaron diferencias entre procedencias. El Componente principal 1 se usó como un índice multidimensional, el cual se combinó con una prueba de comparación de rangos para clasificar las procedencias por separado, de acuerdo al crecimiento y a la calidad de fuste.

La relación entre las variables de estudio con los factores geográficos y ambientales de las procedencias se determinaron con los coeficientes de correlación de *Spearman* para las variables que no cumplieron los supuestos estadísticos, y de *Pearson* para el número de ramas.

Resultados

Supervivencia y crecimiento

La supervivencia y todas las variables de crecimiento tuvieron diferencias significativas entre procedencias ($p \leq 0.0011$), de las cuales El Madroño registró la mayor supervivencia (75.54 %); mientras que Ponthadó, la menor (61.71 %) (Cuadro 2). La Parada presentó los valores más altos de Incremento Periódico Anual de Altura (IPAA), Incremento Periódico Anual de Diámetro Normal (IPADN) y volumen; El Cobre y El Madroño presentaron el mayor diámetro de copa; por el contrario, en Ponthadó se obtuvieron los menores crecimientos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores promedio con comparación de rangos de la supervivencia y crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis*
Donahue & Lopez Upton.

Procedencias	Supervivencia (%)	IPAA (m)	IPADN (cm)	Volumen (dm ³)	Diámetro de copa (m)	Componente principal 1
La Parada	64.38b	0.84a	2.08a	134.6a	2.94a	0.684a
El Madroño	75.54a	0.83ab	2.04ab	130.3ab	3.01a	0.328ab
El Pinalito	69.57ab	0.80ab	2.14a	119.0ab	2.72ab	0.126ab
El Cobre	74.81a	0.84a	1.86cd	121.3ab	3.05a	0.108ab
La Cebada	64.07b	0.83a	1.83bc	115.1bc	2.92a	0.060ab
Molango	68.12ab	0.80bc	1.87bc	111.1bc	2.80ab	-0.155abc
El Piñón	63.29b	0.78bc	1.84bcd	108.0bc	2.76ab	-0.368bc
Ponthadó	60.71b	0.75c	1.76d	99.1c	2.46b	-0.925c

IPAA = Incremento Periódico Anual de Altura; IPADN = Incremento Periódico Anual de Diámetro Basal. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre procedencias.

El Componente principal 1 de la supervivencia y variables de crecimiento (CPrin1) explicó 71.95 % de la variación; el volumen tuvo mayor contribución (0.569), seguido del *IPAA*, *IPADN* y el diámetro de copa (0.481 a 0.469). El CPrin1 presentó diferencias entre procedencias ($p<0.0001$) con valores de -0.925 (Ponthadó) a 0.684 (La Parada); todas las procedencias fueron iguales a La Parada, excepto El Piñón y Ponthadó (Cuadro 2).

Calidad de fuste

El número de unidades de crecimiento, el número de ramas y la rectitud de fuste tuvieron diferencias entre procedencias ($p\leq0.0002$); por el contrario, en el ángulo y el diámetro de ramas no se observaron diferencias significativas entre procedencias ($p\geq0.3558$). El Cobre, El Piñón y La Parada revelaron un menor número de unidades de crecimiento (13.70) y de ramas (42.67) y mayor rectitud de fuste (2.48), respectivamente; mientras que, para las mismas variables, Molango, La Cebada y El Piñón tuvieron los valores más contrastantes (15.17, 46.16 y 1.78) respecto a los valores de las procedencias citadas anteriormente (Cuadro 3). El ángulo y el grosor de las ramas varió de 71.08° a 72.53° y de 1.61 a 2.12 cm (Cuadro 3).

El Componente principal 1 (CPrin1) de las variables de calidad de fuste explicó 65.9 % de la variación; la mayor contribución la aportaron el número de ramas (0.619) y el número de unidades de crecimiento (0.613), seguido de la rectitud de fuste (0.491). El CPrin1 de las variables de calidad de fuste presentaron diferencias significativas entre procedencias ($p\leq0.0001$); La Parada registró el valor más alto y

estadísticamente igual a todas las demás, excepto El Cobre, Ponthadó y El Piñón, las cuales obtuvieron valores más bajos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Promedios y comparación de rangos variables de calidad de fuste en procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & Lopez Upton en Metepec, Estado de México, México.

Procedencia	Unidades de crecimiento	Número de ramas	Rectitud de fuste	Ángulo de ramas (°)	Diámetro de ramas (cm)	Componente principal 1
La Parada	15.14c	47.27b	2.48a	72.37a	2.09a	0.590a
Molango	15.17c	44.00ab	2.30ab	71.81a	1.98a	0.265ab
El Madroño	14.74bc	45.53ab	2.29ab	71.82a	2.08a	0.213ab
La Cebada	13.98abc	46.16b	2.32ab	71.08a	1.99a	0.206ab
El Pinalito	14.69bc	45.56ab	1.94bc	72.53a	2.12a	0.079ab
El Cobre	13.70a	45.20ab	1.98bc	72.52a	2.06a	-0.195b
Ponthadó	14.00ab	44.41ab	2.06bc	71.95a	1.61a	-0.274b
El Piñón	13.92ab	42.67a	1.78c	71.28a	2.05a	-0.421b

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre procedencias.

Relación entre crecimiento y variables ambientales

La latitud presentó correlación positiva alta ($r \geq 0.711$) y significativa ($p \leq 0.047$) con el Incremento Periódico Anual de Altura y de Diámetro Normal, volumen, diámetro de copa y diámetro de ramas. Igualmente, para la precipitación media anual se determinó una correlación positiva y significativa ($r \geq 0.761$, $p \leq 0.028$) con las unidades de crecimiento y la rectitud del fuste; mientras que la altitud solo tuvo

correlación negativa y significativa ($r=-0.786$, $p=0.021$) con el diámetro de ramas, el resto de las correlaciones entre variables no fueron significativas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Coeficiente de correlación y significancia entre variables geográficas y ambientales con el crecimiento y variables de calidad de fuste.

	Sup	IPAA	IPADN	Vol	DC	UC	NR	RF	AR	DR
Latitud	0.540	0.750	0.711	0.894	0.781	0.024	0.424	0.206	0.197	0.714
	0.167	0.032	0.048	0.003	0.022	0.955	0.295	0.625	0.640	0.047
Longitud	0.238	-0.352	0.143	-0.190	-0.238	0.548	-0.381	-0.024	0.286	-0.262
	0.570	0.393	0.736	0.651	0.570	0.160	0.352	0.955	0.493	0.531
Altitud	-0.238	-0.315	-0.690	-0.548	-0.214	-0.143	-0.214	0.143	-0.286	-0.786
	0.570	0.447	0.058	a0.160	0.610	0.736	0.610	0.736	0.493	0.021
Temperatura media anual	0.522	0.161	0.619	0.261	0.247	0.481	-0.302	-0.069	0.165	0.275
	0.184	0.703	0.102	0.532	0.555	0.227	0.467	0.872	0.696	0.510
Precipitación media anual	0.051	0.375	0.108	0.335	0.278	0.761	0.458	0.935	-0.176	-0.233
	0.905	0.361	0.800	0.417	0.505	0.028	0.254	0.001	0.676	0.578
pH	-0.257	-0.325	-0.105	-0.395	-0.451	0.593	-0.024	0.314	-0.118	-0.371
	0.538	0.433	0.805	0.333	0.262	0.121	0.956	0.448	0.780	0.366

Sup = Supervivencia, *IPAA* = Incremento Periódico Anual de Altura; *IPADN* = Incremento Periódico Anual de Diámetro Basal; *Vol* = Volumen; *DC* = Diámetro de copa; *UC* = Unidades de crecimiento; *NR* = Número de ramas; *RF* = Rectitud de fuste; *AR* = Ángulo de ramas; *DR* = Diámetro de ramas.

Discusión

Las diferencias entre procedencias en caracteres de crecimiento y calidad de fuste determinadas en este estudio se deben a la influencia del factor genético, factores ambientales y a la interacción de ambos (White et al., 2007; Zobel & Talbert, 1988); e indican que las procedencias responden de manera diferencial a las condiciones ambientales del sitio de plantación, lo que se manifiesta en su distinto grado de adaptabilidad (Rodríguez-Laguna et al., 2008).

Para la supervivencia, el número y el ángulo de ramas, el factor genético pudo ser crucial en las diferencias entre procedencias, ya que estas variables no se asociaron con las variables ambientales; sin embargo, el control genético del ángulo de ramas fue moderado ($h^2=0.21$ a 0.35) en *P. greggii* var. *australis* (Reyes-Esteves et al., 2022). Otra posibilidad es que factores ambientales no considerados en la presente investigación están influyendo; por ejemplo, las temperaturas mínimas y el fotoperíodo que determinan las diferencias entre procedencias de la variedad *greggii* (Valencia-Manzo et al., 2017).

Las diferencias de crecimiento, unidades de crecimiento, rectitud del fuste, ángulo y diámetro de ramas se deben, posiblemente, a las adaptaciones genéticas de las procedencias a las variaciones de los ambientes (López-Upton et al., 2004), moldeadas por la longitud, la altitud y la precipitación media anual. El control genético para el crecimiento en diámetro, altura y volumen de la variedad *australis* es moderado ($h^2=0.21$ a 0.47), así como para unidades de crecimiento, rectitud de fuste y diámetro de ramas ($h^2=0.21$ a 0.39) (Azamar-Oviedo et al., 2000; Reyes-Esteves et al., 2022). La relación positiva de variables de crecimiento con la latitud indica que procedencias más norteñas presentan mayor crecimiento; además corresponden a altitudes más bajas respecto al resto, por lo que se cumple el

supuesto general de admitir el movimiento de procedencias de altas latitudes con bajas altitudes hacia sitios de baja latitud con grandes altitudes (Zobel & Talbert, 1988).

La altitud solo influyó en el diámetro de ramas; a mayor altitud de las procedencias, las ramas fueron más delgadas. De manera similar, el crecimiento en altura de la variedad *greggii* se asoció negativamente con la altitud de las procedencias (Rodríguez-Laguna et al., 2008).

Por otra parte, los contrastes entre las procedencias en unidades de crecimiento y rectitud del fuste se deben, principalmente, a las diferencias en la precipitación media anual, por la alta correlación entre estas variables. Lo anterior, indica que las procedencias de sitios más húmedos presentan fustes más rectos y mayores unidades de crecimiento.

La supervivencia de todas las procedencias evaluadas fue menor al de ambas variedades en dos ensayos (82.4 y 95.9 %) de 17 años en suelos degradados de la Mixteca Oaxaqueña (Ortiz-Mendoza et al., 2021); así como a la supervivencia (92.6 %) en un ensayo de la var. *australis* de seis años en la misma zona del presente estudio (Azamar-Oviedo et al., 2000). Otros ensayos de la variedad *australis* con menor edad (2.5 a 6.5 años) en distintos ambientes, también presentaron mayores supervivencias (69.4 a 99.1 %) (Gómez-Romero et al., 2012; López-Upton et al., 2004; Reyes-Esteves et al., 2022; Valencia-Manzo et al., 2006). La menor supervivencia en el presente estudio era de esperarse debido a que en enero de 2015 dos bloques fueron afectados por un incendio forestal.

El Incremento Periódico Anual de Altura (*IPAA*), del Diámetro Normal (*IPADN*) y de Volumen (*IPAV*) de las procedencias fue menor a los incrementos (*IPAA*=1.36 a 1.54 m, *IPADN*=2.34 a 6.66 cm, *IPAV*=10.2 a 14.5 dm³) de un ensayo (6 años) de la var. *australis* evaluado en la misma zona (Azamar-Oviedo et al., 2000). Otros ensayos de la variedad *australis* (edades de 2.5 y 6 años) establecidos en sitios con

buenas condiciones ambientales, también registraron mayores *IPAA* (1.23 a 2.45 m) e *IPADN* (2.10 a 2.40 cm), mientras que el *IPAV* (7.9 a 12.1 dm³) fue similar (López-Upton et al., 2004; Salazar-García et al., 1999). Por el contrario, los incrementos de este estudio fueron superiores a los de ensayos de la variedad *australis* (*IPAA*=0.40 a 0.76 m, *IPADN*=0.56 a 1.37 cm, *IPAV*=0.16 a 0.30 dm³) establecidos en suelos degradados en la Mixteca de Oaxaca evaluados a diferentes edades (2.5, 5 y 17 años) (Ortiz-Mendoza et al., 2021; Reyes-Esteves et al., 2022; Valencia-Manzo et al., 2006).

Respecto a las unidades de crecimiento, el promedio por año fue inferior al registrado (2.4 a 5.0 año⁻¹) en otros ensayos de la misma variedad (Reyes-Esteves et al., 2022; Salazar-García et al., 1999; Valencia-Manzo et al., 2006; Velasco-Velasco et al., 2012). Las procedencias La Parada, El Cobre y La Cebada, que presentaron mayor crecimiento en altura, cada una siguió diferente estrategia: la primera formó más unidades de crecimiento, la segunda alargó más estas unidades y la tercera presentó una estrategia intermedia. La segunda estrategia se documentó previamente para la variedad *australis* (Salazar-García et al., 1999).

Implicaciones en el uso de las procedencias

La selección de procedencias permite definir aquellas con mayor adaptación para los programas de reforestación, determinar las que presentan más crecimiento para los programas de plantaciones maderables (Rodríguez-Laguna et al., 2008). En este sentido, si se requiere germoplasma para los programas de reforestación o restauración, la supervivencia y el diámetro de copa son las variables más importantes (Rodríguez-Laguna et al., 2008); las copas más amplias protegen y

aportan mayor cantidad de materia orgánica al suelo, lo que disminuye la erosión (Ortiz-Mendoza et al., 2021). Por lo anterior, El Madroño y El Cobre, ambas con los valores superiores en supervivencia y diámetro de copa, son las más adecuadas para fines de reforestación en condiciones similares al sitio del ensayo aquí documentado.

Por el contrario, si se requiere germoplasma para establecer plantaciones maderables, el crecimiento y las variables de calidad del fuste son las más relevantes (White et al., 2007; Zobel & Talbert, 1988). Si el objetivo es producir madera para aserrío, se necesita germoplasma de árboles con rápido crecimiento y fustes que produzcan buena calidad de madera. Los fustes chuecos, con bifurcaciones, abundantes verticilos, ramas gruesas y con ángulo de inserción menores son indeseables, porque disminuyen la calidad de la madera aserrada (Hernández-Hernández et al., 2019; Nocetti & Brunetti, 2024); además, reducen la productividad y aumentan los costos de producción (Cavassin-Diniz et al., 2020).

De acuerdo con el Componente principal 1, La Parada, Molango, El Madroño, El Pinalito, El Cobre y La Cebada, por su mayor crecimiento son las procedencias más apropiadas para plantaciones maderables. Ello era de esperarse, debido a que la fuente de semillas de estas procedencias, excepto La Cebada, corresponden al Huerto Semillero Metepec de polinización libre; por lo que la ganancia genética debe ser mayor (White et al., 2007; Zobel & Talbert, 1988), en comparación con procedencias cuyo germoplasma provino de árboles superiores seleccionados en rodales naturales.

La Cebada presentó un gran crecimiento a pesar de originarse en rodales naturales; mientras que El Piñón se esperaba que tuviera altos crecimientos por provenir del Huerto Semillero. Lo anterior permite asumir que La Cebada y El Piñón tienen buena y mala adaptación, respectivamente, en la zona de Metepec.

No se pueden seleccionar procedencias con base en el diámetro y el ángulo de ramas debido a que no presentaron diferencias en estas variables; sin embargo, entre las procedencias con más crecimiento, La Parada, La Cebada, El Madroño y Molango reunieron a los ejemplares con los fustes más rectos; además, las dos últimas también tuvieron menor número de ramas, por lo que se pueden recomendar para establecer plantaciones maderables en la región de Metepec.

La mayoría de las procedencias con el crecimiento más destacado registraron mayor número de unidades de crecimiento y diámetro de copa, posiblemente por la correlación positiva entre estas variables, como se demostró en *P. greggii* var. *greggii* (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008). Esta condición es posible que sea una estrategia para alcanzar mayor altura (Salazar-García *et al.*, 1999). Por su parte, el diámetro de copa supone un área de intercepción lumínica más amplia, lo cual resulta en mayor potencial para la actividad fotosintética y, por lo tanto, un crecimiento más importante (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008).

El Madroño resultó ser la procedencia élite por su alta supervivencia y copa ancha, altos crecimientos y buena calidad de fuste, por lo que es apta tanto para programas de reforestación, como para plantaciones maderables en la región de Metepec, Estado de México. Dicha procedencia mostró superioridad en crecimiento de diámetro y altura, y menores unidades de crecimiento en varios estudios previos (Ortiz-Mendoza *et al.*, 2021; Salazar-García *et al.*, 1999; Valencia-Manzo *et al.*, 2006; Velasco-Velasco *et al.*, 2012).

Conclusiones

El crecimiento y la calidad del fuste son distintos entre las procedencias de *P. greggii* var. *australis*; estas diferencias se deben a las variaciones genéticas y al efecto ambiental asociado con la latitud, la precipitación y la altitud de origen. El movimiento de procedencias de elevada latitud y con baja altitud a sitios con menor latitud y mayor elevación favorecen el crecimiento de *P. greggii* var. *australis*. La procedencia El Madroño se recomienda tanto para reforestaciones, como para plantaciones maderables, debido a su superioridad en supervivencia, copa, crecimiento y rectitud de fuste.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Posgrado Forestal del Colegio de Postgraduados *Campus* Montecillo y al Dr. Javier López Upton por el apoyo en la producción de planta y establecimiento del ensayo.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses. Mario Valerio Velasco García declara no haber participado en ninguna de las etapas del proceso editorial del artículo.

Contribución por autor

Gabriel Martínez Cantera: trabajo de campo y elaboración de la primera versión del manuscrito; Mario Valerio Velasco García: análisis de datos y redacción del manuscrito; María Ascención Aguilar Morales: revisión del manuscrito. Todos los autores participaron en la concepción de la investigación y aprobación de la versión final del escrito.

Referencias

Azamar-Oviedo, M., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., y Plancarte-Barrera, A. (2000). Evaluación de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. En Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Programa Nacional de Reforestación en México (Comps.), *Memorias del 1er Congreso Nacional de Reforestación* (pp. 1-9). Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

[https://www.researchgate.net/publication/288834300 Evaluacion de un ensayo de procedencias-progenies de Pinus greggii y su conversion a huerto semillero](https://www.researchgate.net/publication/288834300_Evaluacion_de_un_ensayo_de_procedencias-progenies_de_Pinus_greggii_y_su_conversion_a_huerto_semillero)

Burney, O., Aldrete, A., Alvarez-Reyes, R., Prieto-Ruiz, J. A., Sánchez-Velazquez, J. R., & Mexal, J. G. (2015). México—Addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry*, 113(4), 404-413. <https://doi.org/10.5849/jof.14-007>

Carle, J. B., & Holmgren, L. P. B. (2009). Wood from planted forests: global outlook to 2030. In J. Evans (Ed.), *Planted forests: uses, impacts and sustainability* (pp. 47-59). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

<https://doi.org/10.1079/9781845935641.0047>

Carle, J. B., Duval, A., & Ashfordc, S. (2020). The future of planted forests. *International Forestry Review*, 22(1), 65-80.

<https://doi.org/10.1505/146554820829523970>

Cavassin-Diniz, C. C., Timofeiczyk Jr., R., Gonçalves-Robert, R., da Silva-Lopes, E., Garzel-Leodoro da Silva, J. C., Martins-de Oliveira, F., & Silva-Oliveira, G. (2020). Influence of bifurcation on thinning, productivity and harvester production costs of *Pinus taeda* L. *Australian Journal of Crop Science*, 14(8), 1259-1263. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.08.p2377>

Conover, W. J. (2012). The rank transformation-an easy and intuitive way to connect many nonparametric methods to their parametric counterparts for seamless teaching introductory statistics courses. *WIREs Computational Statistics*, 4(5), 332-338. <https://doi.org/10.1002/wics.1216>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Forests for human health and well-being. Strengthening the forest-health-nutrition nexus* (Forestry Working Paper No. 18). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb1468en>

Gómez-Romero, M., Soto-Correa, J. C., Blanco-García, J. A., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., y Lindig-Cisneros, R. (2012). Estudios de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46(8), 795-807.

<https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/994>

Hernández-Hernández, M. L., Velasco-García, M. V., López-Upton, J., Galán-Larrea, R., Ramírez-Herrera, C., y Viveros-Viveros, H. (2019). Crecimiento y supervivencia de procedencias de *Enterolobium cyclocarpum* en la costa de Oaxaca, México. *Bosque*, 40(2), 173-183. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002019000200173>

Imaña E., J., y Encinas B., O. (2008). *Epidometría forestal*. Universidad de Brasilia. <https://www.monografias.com/trabajos-pdf2/epidometria-forestal/epidometria-forestal.pdf>

López-Upton, J., Ramírez-Herrera, C., Plascencia-Escalante, O., y Jasso-Mata, J. (2004). Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus greggii*. *Agrociencia*, 38(4), 457-464. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/338>

Muñoz-Flores, H. J., Velarde-Ramírez, J. C., García-Magaña, J. J., Sáenz-Reyes, J. T., Olvera-Delgadillo, E. H., y Hernández-Ramos, J. (2012). Predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(14), 11-22.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i14.471>

Nocetti, M., & Brunetti, M. (2024). Advancements in wood quality assessment: standing tree visual evaluation—a review. *Forests*, 15(6), 943.

<https://doi.org/10.3390/f15060943>

Ortiz-Mendoza, R., Aguirre-Calderón, O. A., Gómez-Cárdenas, M., Treviño-Garza, E. J., y González-Tagle, M. A. (2021). Crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en suelos degradados de la Mixteca Alta, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64), 4-22. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.710>

Pérez, C. J., Locatelli, B., Vignola, R., e Imbach, P. (2008). Importancia de los bosques tropicales en las políticas de adaptación al cambio climático. *Recursos Naturales y Ambiente*, 51-52, 4-11. <https://www.cifor-icraf.org/es/conocimiento/publicacion/4820/>

Protectora de Bosques del Estado de México. (2024). *Plantaciones forestales comerciales*. Gobierno del Estado de México.

https://probosque.edomex.gob.mx/plantaciones_forestales

Reyes-Esteves, G. I., López-Upton, J., Velasco-García, M. V., & Jiménez-Casas, M. (2022). Genetic parameters of a progeny trial of *Pinus greggii* Engelmann ex Parlatore var. *australis* Donahue & López in the Mixteca Alta of Oaxaca, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(1), 75-88. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.10.067>

Rodríguez-Laguna, R., Valencia-Manzo, S., Meza-Rangel, J., Capó-Arteaga, M. Á., y Reynoso-Pérez, A. (2008). Crecimiento y características de la copa de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Galeana, Nuevo León. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(1), 19-26. <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/31-1/3a.pdf>

Rojas-Vergara, P. (2023). Informe de gira técnica: utilización de técnicas nucleares para mejorar la adaptación y la productividad de especies forestales frente al cambio climático. *Ciencia & Investigación Forestal*, 29(2), 99-111.
<https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.587>

Salazar-García, J. G., Vargas-Hernández, J. J., Jasso-Mata, J., Molina-Galán, J. D., Ramírez-Herrera, C., y López-Upton, J. (1999). Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques*, 5(2), 19-34. <https://doi.org/10.21829/myb.1999.521345>

Sánchez-Rosales, B., Velasco-García, M. V., Hernández-Hernández, A., Gómez-Cárdenes, M., & López-Teloxa, L. C. (2025). Genetic parameters and family selection of *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* through growth and stem quality in Mixteca Oaxaqueña Region, Mexico. *Forests*, 16(6), 959.
<https://doi.org/10.3390/f16060959>

Valencia-Manzo, S., Velasco-García, M. V., Gómez-Cárdenes, M., Ruiz-Muñoz, M., y Capó-Arteaga, M. Á. (2006). Ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en dos localidades de la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(1), 27-32. <https://www.redalyc.org/pdf/610/61029104.pdf>

Valencia-Manzo, S., Playas-Ramos, I., Cornejo-Oviedo, E. H., y Flores-López, C. (2017). Patrón de alargamiento del brote terminal en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en la Sierra de Arteaga, Coahuila. *Madera y Bosques*, 23(1), 133-141. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311555>

Vásquez-García, I., Cetina Alcalá, V. M., Campos-Bolaños, R., y Casal-Ángeles, L. F. (2016). Evaluación de plantaciones forestales en tres comunidades de la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Agroproductividad*, 9(2), 12-19. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/716/585>

Velasco-Velasco, V. A., Enríquez-del Valle, J. R., Rodríguez-Ortiz, G., Campos-Ángeles, G. V., Gómez-Cárdenes, M., y García-García, M. L. (2012). Evaluación de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en plantaciones de la Mixteca

Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 41-50.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i9.534>

Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A. M., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., Fernández-Cázares, S., de los Santos-Posadas, H., Llanderal-Ocampo, T., González, M. de J., López-Upton, J., y Ramírez-Herrera, C. (2013). *Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México*. Comisión Nacional Forestal.

<http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=434>

White, T. L., Adams, W. T., & Neale, D. B. (2007). *Forest genetics*. CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781845932855.0000>

Zobel, B., y Talbert, J. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. Limusa.

https://books.google.com.mx/books/about/T%C3%A9cnicas_de_mejoramiento_gen%C3%A9tico_de.html?id=FusgOgAACAAJ&redir_esc=y



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.