

## Fenotipos sobresalientes de *Pinus chiapensis* y *Pinus douglasiana* en rodales bajo manejo forestal en Oaxaca

### Outstanding phenotypes of *Pinus chiapensis* and *Pinus douglasiana* in forest management stands in Oaxaca

María Mercedes Cervantes-Machuca<sup>1</sup> , Gerardo Rodríguez-Ortiz<sup>1\*</sup> , Wenceslao Santiago-García<sup>2</sup> , José Raymundo Enríquez-del Valle<sup>1</sup> , Gisela Virginia Campos-Angeles<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Carretera al ITAO S/N, San Jesús Nazareno, CP. 71233. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

<sup>2</sup>Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez. Avenida Universidad S/N, CP. 68725. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

\*Autor de correspondencia: gerardo.ro@voaxaca.tecnm.mx

#### Artículo científico

Recibido: 01 de marzo 2023

Aceptado: 08 de abril 2024

**RESUMEN.** En algunas zonas de Oaxaca, México se requiere implementar plantaciones que usen semillas de calidad genética, para aumentar productividad y calidad fenotípica. El objetivo fue seleccionar fenotipos sobresalientes de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen y *P. douglasiana* Martínez, a través de sus características cuantitativas y cualitativas. En 2021 se seleccionaron 15 fenotipos superiores por especie, para evaluar variables dasométricas (altura, diámetro), densidad (árboles ha<sup>-1</sup>), edad e incrementos en virutas, registro de datos climáticos y de sitio. En cada árbol se determinó área de copa (m<sup>2</sup>), área basal (m<sup>2</sup>) y volumen total con corteza (VTcc, m<sup>3</sup>); se determinó índice de sitio (IS) con base a curvas anamórficas, guías de densidad y promedio de VTcc. Los datos se analizaron con pruebas t-Student, correlación de Pearson ( $\alpha = 0.05$ ), análisis clúster y análisis de componentes principales. Las especies mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ) en características dasométricas. Al utilizar el volumen promedio como criterio de selección seis árboles de *P. chiapensis* presentaron volúmenes superiores al promedio ( $\geq 9.76$  m<sup>3</sup>) y siete árboles de *P. douglasiana* obtuvieron mayor volumen al promedio ( $> 4.14$  m<sup>3</sup>) y altura de fuste limpio (18.7 m), en sitios con alta precipitación; mientras que, comparando características morfológicas, de sitio y climáticas, se seleccionaron 10 individuos de *P. chiapensis* y seis de *P. douglasiana* con IS de excelente calidad. Los árboles seleccionados tienen características sobresalientes de calidad de madera y volumen, por lo que conviene usarlos para colectar semilla en la zona de estudio.

**Palabras clave:** Índice de sitio, selección fenotípica, variables climáticas, volumen.

**ABSTRACT.** In some areas of Oaxaca, Mexico, it is necessary to implement plantations that use seeds of genetic quality, to increase productivity and phenotypic quality. The objective was to select outstanding phenotypes of *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen and *P. douglasiana* Martínez, evaluating quantitative and qualitative characteristics. In 2021, 15 superior phenotypes per species were selected to evaluate inventory variables (height, diameter), density (trees ha<sup>-1</sup>), age and chip increments, recording climate and site data. Crown area (m<sup>2</sup>), basal area (m<sup>2</sup>) and total volume with bark (VTcc, m<sup>3</sup>) were determined for each tree; site index (SI) was determined based on anamorphic curves, density guides and average VTcc. Data were analyzed with Student's t tests, Pearson's correlation ( $\alpha = 0.05$ ), cluster analysis, and principal component analysis. The species showed significant differences ( $p \leq 0.01$ ) in dasometric characteristics. Using the average volume as a selection criterion, six *P. chiapensis* trees presented volumes above average ( $\geq 9.76$  m<sup>3</sup>) and seven *P. douglasiana* trees presented volume above average ( $> 4.14$  m<sup>3</sup>) and clear stem height (18.7 m), in places with high precipitation; while comparing morphological, of site and climatic characteristics, 10 individuals of *P. chiapensis* and six of *P. douglasiana* with excellent quality IS were selected. The selected trees have outstanding characteristics of wood quality and volume, so it is convenient to use them to collect seeds in the study area.

**Keywords:** Site index, phenotypic selection, climatic variables, volume.

**Como citar:** Cervantes-Machuca MM, Rodríguez-Ortiz G, Santiago-García W, Enríquez-del Valle JR, Campos-Angeles GV (2024) Fenotipos sobresalientes de *Pinus chiapensis* y *Pinus douglasiana* en rodales bajo manejo forestal en Oaxaca. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(2): e3667. DOI: 10.19136/era.a11n2.3667.

## INTRODUCCIÓN

En poblaciones grandes de una especie arbórea se observa abundante variabilidad fenotípica y se conoce que la magnitud de expresión de diversas características es heredable a la progenie (Villegas-Jiménez *et al.* 2016). La variabilidad se conoce al tomar datos a numerosos ejemplares y del ambiente en que crecen, de tal manera que se identifican individuos sobresalientes en características de interés para usarlos como progenitores de la siguiente generación que permita aumentar las ganancias genéticas; además de proteger especies y poblaciones (Muñoz *et al.* 2012).

A partir de la variabilidad en las poblaciones se seleccionan individuos superiores que se usan para el mejoramiento genético (Vallejos *et al.* 2010), lo cual permite separar genotipos en base a múltiples características fenotípicas (Rodríguez-Ortiz *et al.* 2021) como es la altura total, diámetro normal, ángulo de inserción de ramas, rectitud del fuste, entre otras (Cornejo *et al.* 2009, Escobar-Sandoval *et al.* 2018). Ya que se conoce que la variación fenotípica en las especies es resultado de variaciones genotípicas, pero que su grado de expresión es debido a los ambientes en que se encuentran (Martínez *et al.* 2020). Bajo este contexto, gracias al establecimiento de programas de mejoramiento genético es posible obtener descendencias que expresen mayor velocidad de crecimiento, adaptación y resistencia a plagas respecto a la población en que se seleccionaron sus progenitores (Pascual-López *et al.* 2020). Entonces, los individuos de mayor rendimiento se usan para reforestar o establecer plantaciones comerciales (Pastrana-Vargas *et al.* 2012, Reyes-Esteves *et al.* 2021). La selección de árboles fenotípicamente superiores es una alternativa a corto plazo para la producción de semilla de mejor calidad (Morales *et al.* 2013, Rodríguez-Vásquez *et al.* 2018) ya sea para comercialización o plantaciones con manejo forestal y así conservar la diversidad y obtener ganancias en adaptabilidad (Oliva y Rimachi 2017).

Por lo anterior, se pretende lograr plantaciones con mayor supervivencia, productividad y calidad de la cosecha (Salaya-Domínguez *et al.* 2012), que resulta de una secuencia de actividades: el programa de mejoramiento genético de individuos que se debe complementar con procedimientos de la propagación en vivero, y el manejo de las plantaciones y reforestaciones (Fuentes-Amaro *et al.* 2020).

La selección de árboles en poblaciones diferentes es para aprovechar la variación en las diversas características, en sitios que difieren en calidad (Rodríguez-Ortiz *et al.* 2020) que representa la respuesta al desarrollo de una especie a las condiciones ambientales (climáticas, bióticas y edáficas) existentes en el lugar (Aragón *et al.* 2020). Ante el cambio climático, México presenta un escenario para el año 2030 de un aumento de 1.5 °C en la temperatura media anual y una disminución del 7% en la precipitación (Sáenz-Romero *et al.* 2010); por lo anterior, la selección de fenotipos debe incluir patrones de variación genética a través de un gradiente altitudinal y diferentes ambientes (Mondino *et al.* 2019). En las últimas décadas se implementó en plantaciones forestales comerciales enfocadas en la producción intensiva de madera en Tabasco, Campeche, Chiapas, Veracruz y Oaxaca, técnicas de programas de mejora genética permitiendo así mejorar la salud, resistencia y adaptabilidad de las especies (Ambrocio-Hernández *et al.* 2022); por otro lado, Aragón *et al.* (2020) evaluaron características reproductivas en árboles superiores de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G. Harrison y las correlacionaron con variables ambientales y dasométricas de los progenitores, encontrando que los individuos procedentes de San Pedro

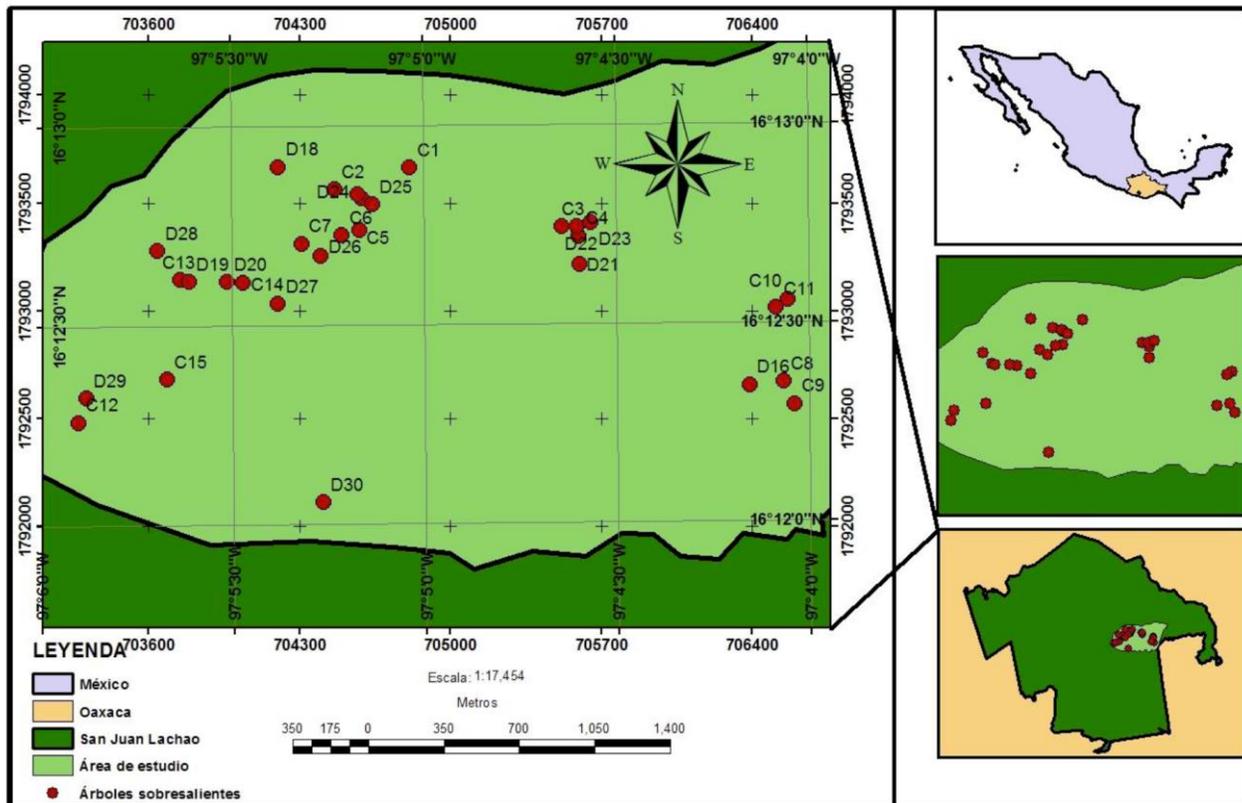
Yolox presentaron mayores indicadores reproductivos y una mayor adaptabilidad; Viveros-Viveros et al. (2013) evaluaron la variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación; Castellanos-Acuña et al. (2013) evaluaron la variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoiana* y *P. leiophylla* en un ensayo de vivero, este posible movimiento altitudinal debe incluir la migración asistida y debe considerar las diferencias genéticas entre poblaciones. Por lo anterior, es necesario aumentar los estudios sobre esta distribución de las especies de *Pinus* (Aparicio-Rentería et al. 2020), lo cual detiene la implementación de lineamientos para el movimiento de plántulas que se usen en reforestación y adaptación ante el cambio climático (Castellanos-Acuña et al. 2013). En San Juan Lachao, *Pinus douglasiana* se encuentra en rodales bajo manejo forestal (Pascual-López et al. 2020) y *P. chiapensis* bajo conservación por estar en la categoría de protección especial en la NOM059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT 2010); ambas especies son de importancia económica por su alto potencial maderable (crecimiento rápido, calidad de madera, fuste recto). Pascual-López et al. (2020) realizaron dentro de las áreas bajo manejo forestal del municipio de San Juan Lachao, Oaxaca, en el año 2014, la selección de 30 árboles superiores por el método de regresión lineal de manera sistemática en todas las condiciones del área con mayor presencia de *P. chiapensis* en una superficie total de 415 ha; por otro lado, en 2015 se delimitó y se estableció un área semillera para *P. chiapensis* (Martínez) Andresen mezclado con *P. douglasiana* Martínez en una superficie de 15.42 ha. Por lo anterior, la selección y valoración de árboles fenotípicamente sobresalientes permite la producción de semilla de calidad para producir plántula en vivero y establecer pruebas de progenies en campo y como resultado de su evaluación generen información sobre la calidad genética de los progenitores, útil para el establecimiento de huertos semilleros (Muñoz et al. 2011, SE 2016). El objetivo del presente trabajo fue seleccionar, con base en características cuantitativas y cualitativas fenotipos sobresalientes de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen y *P. douglasiana* Martínez de San Juan Lachao, Oaxaca.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

En 2021 se realizaron recorridos en las 14 204 ha de rodales de bosques comunales de la comunidad de San Juan Lachao, Juquila, Oaxaca, México; ubicado entre 16° 09' 30.26" LN y 97° 07' 28.04" LO a una altitud de 1 900 m (Pascual-López et al. 2020) (Figura 1).

El clima predominante en la zona es cálido sub húmedo, con temperatura promedio de 22°C, y precipitación de 2 500 mm anuales (Pascual-López et al. 2020). La vegetación en el área corresponde a bosque mesófilo de montaña, con asociación de *P. chiapensis* (Mart.) Andresen, *P. douglasiana* Martínez, *P. devoniana* Lindle, *P. teocote*, Schltld. et Cham., *P. oocarpa* Schiede., *Quercus* sp., *P. maximinoi* H.E. Moore., *P. pseudostrobus* Lindl, entre otras. Las existencias volumétricas total árbol (VTA) de las especies bajo estudio en el área de manejo forestal son: *P. chiapensis* (30 128 m<sup>3</sup> VTA) y *P. douglasiana* (249 193 m<sup>3</sup> VTA) (Reyes-Zurita et al. 2020).



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio en la comunidad de San Juan Lachao, Juquila, Oaxaca, México. C = *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen, D = *P. douglasiana* Martínez.

### Selección de fenotipos sobresalientes

En 2021 se realizó la selección de 15 fenotipos por cada especie, se tomaron en cuenta características cualitativas como dominancia, rectitud de fuste, ángulo de ramas, copa, estado fenológico, daños físicos, plagas y enfermedades; para *P. chiapensis* se enumeraron consecutivamente del 1 a 15, y para *P. douglasiana* del 16 al 30, y se referenció geográficamente mediante GPS (Garmin modelo map76CSx) cada árbol (Tabla 1); se utilizó la metodología de árboles por comparación o testigos (Muñoz *et al.* 2013), que asigna puntos para cada característica cualitativa y compara con cinco árboles testigo. A cada árbol sobresaliente (AS) se le cuantificó la altura total (AT, m) y de fuste limpio (m) con ayuda de un clinómetro Suunto (modelo Pms/360pc), diámetro normal (DN, cm) con una cinta diamétrica, diámetro de copa (m), distancia entre los vecinos más cercanos (m) con un flexómetro y extracción de virutas con ayuda de un taladro de Pressler (marca HAGLOF modelo BS013, 1 000 mm/39"); además de la exposición, pendiente, coordenadas geográficas y altitud (m). Con estas últimas se determinaron las variables climáticas del sitio en que se ubica cada individuo con ayuda de la plataforma World Climate (2022).

**Tabla 1.** Localización y características de árboles sobresalientes (AS) de San Juan Lachao, Oaxaca.

ID	Coordenadas UTM		Altura total (m)	Diámetro normal (cm)	Volumen (m <sup>3</sup> rta)	Área basal (m <sup>2</sup> )
	X	Y				
<i>Pinus chiapensis</i> (Martínez) Andresen						
AS1	704811	1793664	34.00	70.00	9.00	0.38
AS2	704462	1793564	23.00	75.00	8.34	0.44
AS3	705516	1793391	33.00	60.00	6.38	0.28
AS4	705594	1793348	34.00	33.20	1.84	0.08
AS5	704578	1793373	28.00	80.00	10.70	0.50
AS6	704498	1793352	29.00	89.00	13.69	0.62
AS7	704311	1793312	30.00	60.60	6.17	0.28
AS8	706545	1792678	31.00	90.10	14.59	0.63
AS9	706596	1792573	33.00	58.70	6.09	0.27
AS10	706564	1793058	36.00	65.00	7.94	0.33
AS11	706508	1793021	27.00	97.30	15.88	0.74
AS12	703277	1792480	24.00	58.00	4.95	0.26
AS13	703749	1793143	39.00	95.00	18.61	0.70
AS14	704040	1793128	33.00	94.00	16.55	0.69
AS15	703688	1792682	32.00	57.00	5.62	0.25
<i>Pinus douglasiana</i> Martínez						
AS16	706387	1792660	34.00	65.40	4.99	0.33
AS17	704588	1793524	31.00	69.00	5.09	0.37
AS18	704202	1793667	31.00	58.00	3.64	0.26
AS19	703788	1793135	31.50	58.00	3.69	0.26
AS20	703965	1793135	27.00	63.50	3.82	0.31
AS21	705597	1793219	21.00	44.00	1.50	0.15
AS22	705585	1793392	35.00	79.00	7.38	0.49
AS23	705651	1793410	24.00	75.00	4.74	0.44
AS24	704570	1793539	27.00	65.00	4.00	0.33
AS25	704638	1793493	30.00	52.00	2.86	0.21
AS26	704401	1793256	24.00	56.00	2.69	0.24
AS27	704202	1793032	29.00	64.00	4.14	0.32
AS28	703643	1793277	29.00	79.00	6.22	0.49
AS29	703313	1792594	25.00	76.00	5.04	0.45
AS30	704412	1792113	20.00	45.00	1.50	0.15

ID = identificador del árbol en campo; rta = rollo total árbol.

## Estimación de variables de inventario y calificación de fenotipos

A cada árbol se le determinó: área de copa (AC, m<sup>2</sup>)  $AC = \frac{\pi}{4}(DN)^2$ ; área basal (AB, m<sup>2</sup>)  $AB = \frac{\pi}{4}\left(\frac{DN}{100}\right)^2$  y volumen total con corteza (VTcc, m<sup>3</sup>) mediante las ecuaciones para *P. douglasiana* (Vargas-Larreta et al. 2017) y *P. chiapensis* (Chávez-Pascual et al. 2013). En las virutas se determinó: edad (años); área basal de viruta (ABV, cm<sup>2</sup>)  $ABV = \frac{\pi}{4}(\text{Longitud de viruta})^2$ ; área de duramen (AD, m<sup>2</sup>)  $AD = AB - AA$ ; área de albura (AA, cm<sup>2</sup>)  $AA = \left(\pi\left(\frac{DN}{2}\right)^2 - \text{Radio de albura}\right)^2$ ; además el volumen verde (VV, cm<sup>3</sup>) con la fórmula de Newton (Gómez et al. 2018), peso fresco (PF, g); peso seco (PS, g) después de secado en estufa (Beschickung/Loading-modell 100-800 Memmert Experts in Thermostatics) y gravedad específica (GE, kg m<sup>-3</sup>)  $GE = \frac{PS}{VV}$ .

La densidad arbórea por hectárea se obtuvo del cociente  $\frac{10\ 000}{(\text{Distancia promedio hacia los árboles testigo})^2}$ . El índice de sitio (IS) se determinó mediante el ajuste del modelo de regresión de Schumacher que emplea las variables edad y altura de árboles dominantes para generar curvas anamórficas.

$$AT = \beta_0 e^{-\beta_1 \left[\frac{1}{E}\right]}$$

Donde: AT = altura total (m); E = edad (años);  $\beta_0$  y  $\beta_1$  = parámetros de estimación; e = base de los logaritmos naturales (2.71 828).

Con el modelo generado las calidades de sitio se clasificaron en excelente, muy bien, medio, regular y pobre; con ello se calificó cada fenotipo. Se obtuvo la línea promedio de VTcc por especie que sirvió para calificar fenotipos por arriba y abajo del promedio.

## Análisis estadístico

En las variables se probó el supuesto de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk ( $\alpha = 0.05$ ), la GE y AD se transformaron a  $\log_{10}\sqrt{x} + 1$ . Las especies se diferenciaron mediante pruebas de comparación t-Student ( $\alpha = 0.05$ ) y los fenotipos se seleccionaron mediante análisis PCA (procedimiento PRINCOMP); se integraron análisis clúster para clasificar árboles sobresalientes por especie. Los datos climáticos se correlacionaron (Pearson, 0.05) con variables dasométricas de árboles y del sitio. Todos los análisis fueron desarrollados en el Sistema de Análisis Estadístico (SAS 2014).

## RESULTADOS

### Comparación entre especies

La mayoría de las variables evaluadas se diferenciaron entre especies ( $p \leq 0.05$ ), excepto las variables dasométricas DN, AB y diámetro y área de copa; por otro lado, las variables cualitativas, así como las de sitio y climáticas fueron en su mayoría similares ( $p > 0.05$ ) debido a la metodología de selección empleada. Los árboles sobresalientes de *P. chiapensis* (Mart.) Andresen son de mayor tamaño en volumen (9.76 m<sup>3</sup>) debido a su longevidad; de igual forma presentan mayor área de albura (1 318.4 cm<sup>2</sup>), esto se relaciona estrechamente con la altura y el diámetro, debido a que crecen en ambientes con precipitación alta; además, posee baja densidad (260

árboles ha<sup>-1</sup>) permitiendo potencialidad del crecimiento. Por otro lado, *P. douglasiana* Martínez poseen mayor área de duramen, lo cual se refleja en que su madera es de mayor gravedad específica (0.53 g cm<sup>-3</sup>) y que además poseen tallos más altos (18.66 m), diámetro normal de 63.26 cm y áreas de copa de 7.83 m<sup>2</sup> (Tabla 2).

**Tabla 2.** Indicadores morfológicos, cualitativos y de sitio de árboles selectos.

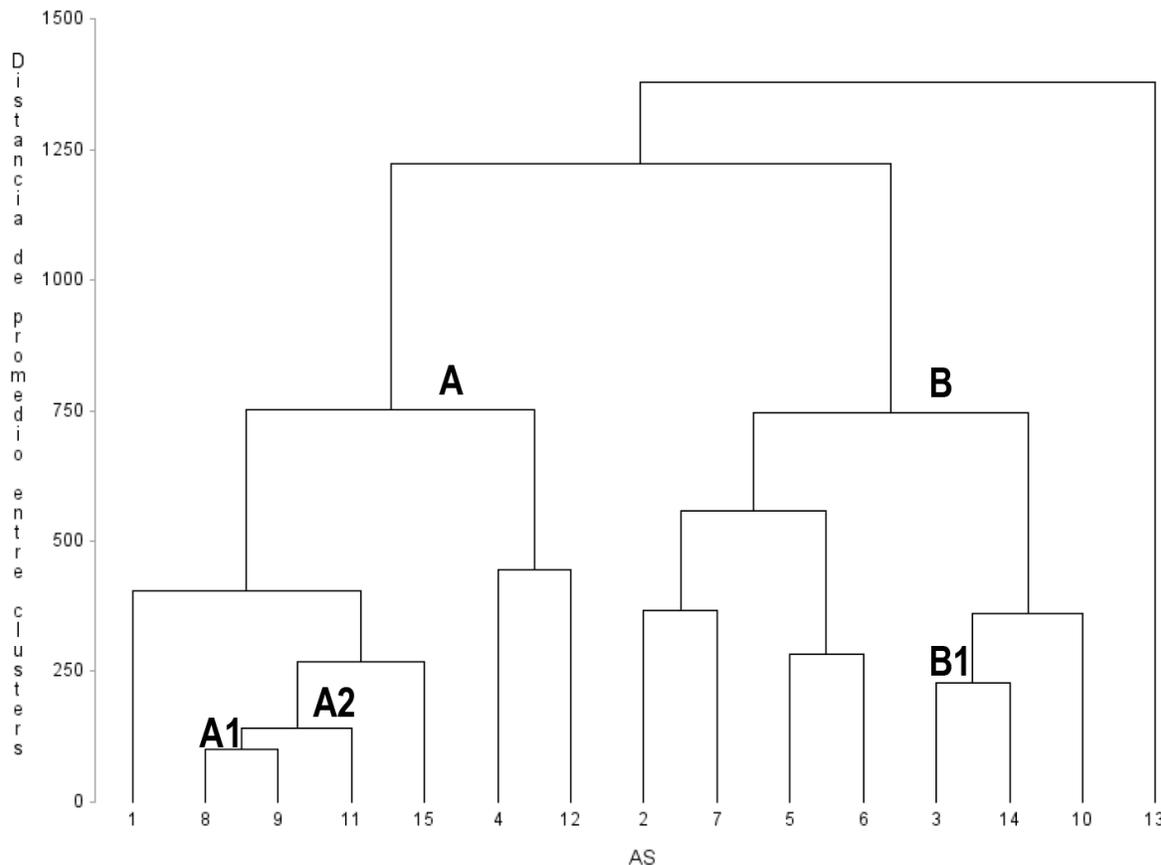
Variable	Valor t	<i>Pinus chiapensis</i> (Mart.) Andresen	<i>P. douglasiana</i> Martínez
Altura total (m)	1.97*	31.06 ± 4.33*	27.90 ± 4.44*
Diámetro normal (cm)	1.60 <sup>ns</sup>	72.19 ± 4.76 <sup>ns</sup>	63.26 ± 2.90 <sup>ns</sup>
Diámetro de copa (m)	0.28 <sup>ns</sup>	10.27 ± 0.80 <sup>ns</sup>	9.98 ± 0.67 <sup>ns</sup>
Área de copa (m <sup>2</sup> )	0.28 <sup>ns</sup>	8.06 ± 0.63 <sup>ns</sup>	7.83 ± 0.52 <sup>ns</sup>
Altura de fuste limpio (m)	-2.41**	14.40 ± 1.26**	18.66 ± 1.24**
Volumen (m <sup>3</sup> )	4.19**	9.76 ± 1.28**	4.08 ± 0.41**
Área basal (m <sup>2</sup> )	1.85 <sup>ns</sup>	0.43 ± 0.05 <sup>ns</sup>	0.32 ± 0.02 <sup>ns</sup>
Edad (años)	3.64**	91.33 ± 6.08**	63.26 ± 4.74**
Contenido de humedad en madera (%)	11.53**	138.8 ± 689**	42.98 ± 4.64**
Gravedad específica (g cm <sup>-3</sup> )	-3.97**	0.43 ± 0.01**	0.53 ± 0.01**
Área de duramen (cm <sup>2</sup> )	-5.05**	771.9 ± 92.10**	1620.9 ± 168**
Área de albura (cm <sup>2</sup> )	5.87**	1 318.4 ± 158.5**	365.5 ± 35.79**
Índice de sitio	1.65 <sup>ns</sup>	83.66 ± 5.82 <sup>ns</sup>	69.33 ± 6.41 <sup>ns</sup>
Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )	-1.12**	260.1 ± 46.73**	410.8 ± 126.2**
Pendiente (%)	-0.11 <sup>ns</sup>	51.33 ± 2.87 <sup>ns</sup>	51.80 ± 2.94 <sup>ns</sup>
Altitud (m)	-0.35 <sup>ns</sup>	1 778.8 ± 22.32 <sup>ns</sup>	1 788.5 ± 16.31 <sup>ns</sup>
Temp/min (°C)	0.10 <sup>ns</sup>	9.42 ± 0.05 <sup>ns</sup>	9.42 ± 0.04 <sup>ns</sup>
Temp/max (°C)	0.37 <sup>ns</sup>	25.89 ± 0.15 <sup>ns</sup>	25.82 ± 0.12 <sup>ns</sup>
Precipitación media anual (mm)	-0.58*	1 411.6 ± 7.37*	1 417.2 ± 6.21*
Temperatura media anual (°C)	0.35 <sup>ns</sup>	17.71 ± 0.12 <sup>ns</sup>	17.66 ± 0.08 <sup>ns</sup>

Temp/min = temperatura mínima media en los meses más fríos; Temp/max = temperatura máxima media en los meses más cálidos; Media ± error estándar (t-Student, 0.05); \*\* = Alta significancia ( $p \leq 0.01$ ); \* = significativo ( $p \leq 0.05$ ); <sup>ns</sup> = no significativo ( $p > 0.05$ ).

### Selección de fenotipos y correlaciones

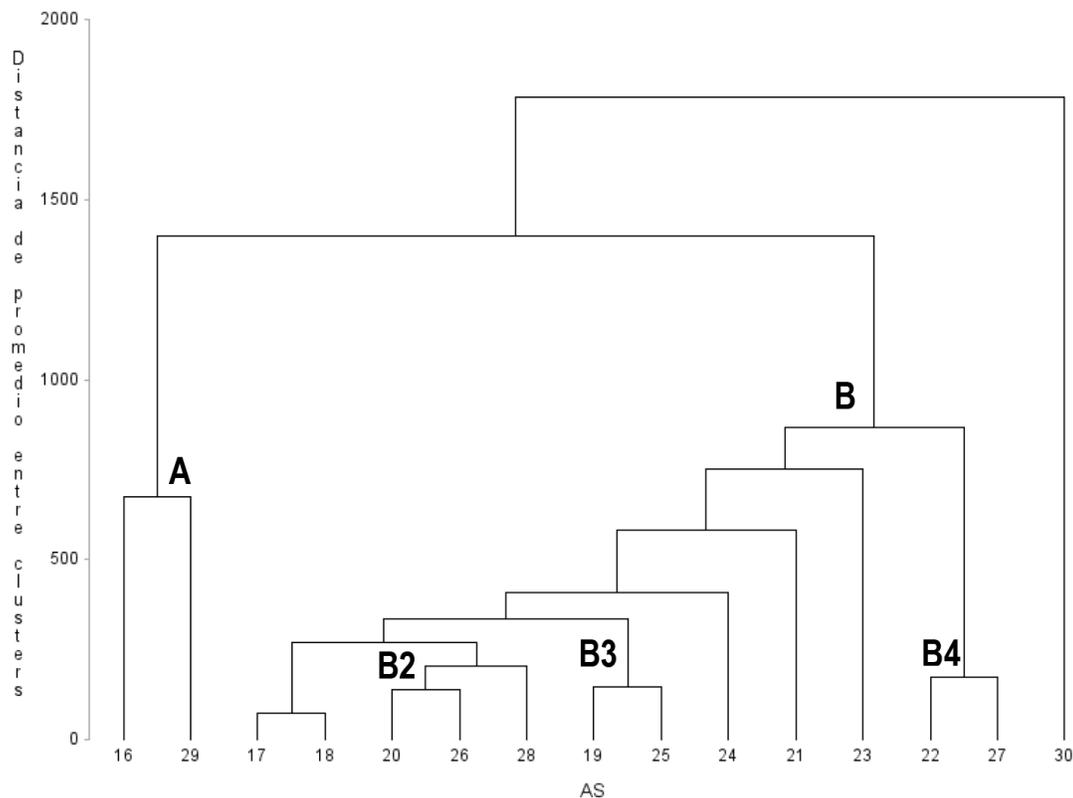
La clasificación jerárquica de los árboles selectos de *P. chiapensis* en el análisis clúster muestra dos grandes grupos, A y B, los cuales se determinaron por variables dasométricas, de sitio y climáticas; se observó entre los grupos formados, el grupo A1 con una mínima distancia de 101.74 (árboles 8 y 9) en características morfológicas y climáticas; seguido del grupo A2 con una distancia de 139.88 y conformado por los árboles 8, 9 y 11, los cuales comparten similitud en cuanto a características morfológicas. Es de destacar que a una distancia euclídea promedio de 1 377.8 el AS13 se separó del resto de árboles debido a características cuantitativas superiores (altura total, diámetro normal, volumen y área basal), de sitio y climáticas diferentes al resto de los individuos (Figura 2). De igual manera, para *Pinus douglasiana* Martínez el AS30 se separó del resto de la

muestra a una distancia euclídea promedio de 1 800 debido a que posee variables dasométricas inferiores al resto de los individuos como es en altura total, diámetro normal, volumen y área basal. Los AS 16 y 29 (grupo A) se separan a una distancia promedio de 674.14 con relación al grupo B debido a diámetro normal y volumen superior a los individuos dentro del grupo B (Figura 3).

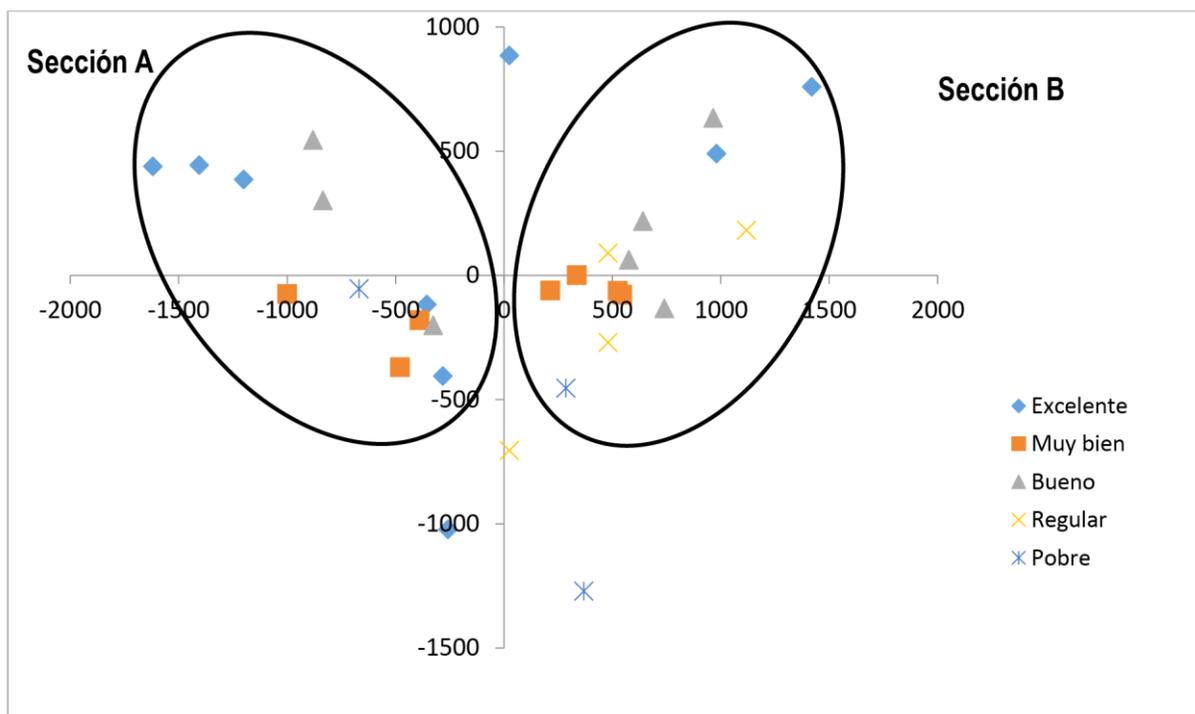


**Figura 2.** Dendrograma de los árboles sobresalientes (AS) de *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en rodales naturales bajo manejo en San Juan Lachao, Juquila, Oaxaca.

El análisis de componentes principales (PCA) mostró que los primeros dos componentes explican el 87.46% de la variabilidad existente en los fenotipos; se identificaron dos secciones (A y B) dentro de las dos especies excepto por los árboles 5 de *P. chiapensis*, 21 y 30 de *P. douglasiana*, quienes mostraron evidente disimilitud entre las secciones (Figura 4). La sección A alberga árboles con índices de sitios (IS) de mejor calidad asociado mayoritariamente a *P. chiapensis* (Martínez) Andresen, y se encuentra una representación de siete árboles (14, 3, 10, 1, 9, 4 y 13) con calidad de sitio excelente y seis individuos con IS aceptables; sin embargo, el árbol 2 se encontró con un índice de sitio bajo. Para esta especie, los árboles que presentaron volumen > 9.76 m<sup>3</sup> fueron: 13, 14, 11, 8, 6, y 5, por lo que se consideran los mejores fenotipos. Por otro lado, la sección B se encuentra representada por *P. douglasiana* en donde se observa los árboles 22 y 16 con IS de calidad excelente; sin embargo, gran parte de los individuos solo presentan un IS calificado como bueno y bajo. Los árboles superiores a su promedio en volumen de la especie fueron el 8, 14, 2, 15, 1, 9 y 13 con rango de variación entre 4.14 y 7.39 m<sup>3</sup> (Figura 4).



**Figura 3.** Dendrograma de los árboles sobresalientes (AS) de *Pinus douglasiana* Martínez en rodales naturales bajo manejo en San Juan Lachao, Juquila, Oaxaca.



**Figura 4.** Análisis de componentes principales (ACP) donde se muestra la separación de las dos especies con respecto al índice de sitio. Sección A= *P. chiapensis*, Sección B= *P. douglasiana*.

Otras variables que mostraron correlaciones significativas positivas con las variables climáticas fueron: diámetro de copa, área de copa, longitud de fuste limpio (LFL) y densidad arbórea (Tabla 3). En el caso de *P. douglasiana*, la LFL mostró correlación significativa ( $r > 0.64$ ) con las diferentes temperaturas de los sitios. Para *P. chiapensis* los análisis de correlación (Tabla 3) mostraron relaciones negativas significativas entre la temperatura máxima, media y mínima de los sitios y el DN; sin embargo, este último se correlacionó de manera positiva ( $r = 0.15$ ) con la precipitación media anual.

**Tabla 3.** Correlaciones significativas entre características morfológicas, cualitativas y de sitio de *Pinus chiapensis* y *P. douglasiana* y las características climáticas.

	Temperatura mínima media en los meses más fríos (°C)	Temperatura máxima media en los meses más cálidos (°C)	Precipitación media anual (mm)	Temperatura media anual (°C)
<b><i>Pinus chiapensis</i> (Mart.) Andresen</b>				
Diámetro normal (cm)	-0.15*	-0.15*	0.15*	-0.17*
Diámetro de copa (m)	0.15*			
Área de copa (m)	0.16*			
Altura de fuste limpio (m)	0.59**	0.54**		0.56**
Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )				0.17*
Altitud (m)	-0.97**	-0.99**	0.93**	-0.99**
<b><i>Pinus douglasiana</i> Martínez</b>				
Altura de fuste limpio (m)	0.70**	0.66**	-0.58*	0.64**
Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )	-0.57**	-0.66**	0.74**	-0.63**
Altitud (m)	-0.98**	-0.99**	0.93**	-0.99**

\*\*= Alta significancia ( $p \leq 0,05$ ). \* = significativo. Pearson ( $\alpha = 0.05$ ).

## DISCUSIÓN

### Comparación entre especies

La diferenciación de las variables dasométricas, de sitio y climáticas entre especies tomó importancia en la selección de árboles sobresalientes, lo cual permite deducir que *P. chiapensis* presenta en general mejores características. Al respecto, Cornejo *et al.* (2009) determinaron la selección de árboles de *P. greggii* Engelm. var. *greggii* con base en altura total, diámetro normal, diámetro de copa, diámetro de ramas y volumen. Mientras que Muñoz-Flores *et al.* (2015) encontraron que la exposición es un factor fundamental para la adaptabilidad en campo y principalmente para índices de crecimiento altos en altura y diámetro para *P. chiapensis*, lo cual permite proporcionar información valiosa de adaptación al sitio. Los rangos de altura y diámetro normal de ambas especies estudiadas coinciden con los rangos establecidos en diámetro (56-77 cm) y altura (27-38 m) por Muñoz *et al.* (2011) para *P. pseudostrobus* Lindl., lo cual puede garantizar la calidad de los fenotipos sobresalientes.

Los árboles sobresalientes de *P. douglasiana* presentaron mayor altura de fuste limpio, indicativo de una mejor poda natural, misma que se asocia con árboles jóvenes. Al respecto Sánchez y del Castillo (2001), obtuvieron resultados contrastantes en *P. chiapensis* (Mart.)

Andresen al determinar que mayores intervalos de edad (64 a 127 años) generan mayor altura total y de LFL. Por otro lado, *P. chiapensis* mostró volúmenes superiores a los reportados por Melchor *et al.* (2010), quienes encontraron volúmenes de 4.69 m<sup>3</sup> para categorías diamétricas de 50 cm en árboles de Puebla y Veracruz. La baja densidad arbórea de *P. chiapensis* se origina por su mayor corpulencia en altura, diámetro, volumen y por lo disperso de sus poblaciones; sobre lo mismo Capilla-Dinorin *et al.* (2021) recomiendan para esta especie densidades bajas (135 árboles ha<sup>-1</sup>) para la obtención de una buena producción de semillas.

### Selección de fenotipos y correlaciones

Los árboles de *P. chiapensis* y *P. douglasiana* mostraron similitud entre sus características morfológicas, debido a los rodales homogéneos en diámetro, altura y edad, lo que coincide con Farfán *et al.* (2002) quienes para *P. ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite* encontraron correlación  $r=0.90$ , para el diámetro y la altura; es decir, al seleccionar por medio del diámetro, también se obtiene una respuesta elevada en altura para los árboles. Variables similares con las que reportaron Cornejo *et al.* (2009) quienes basaron su selección de 35 árboles de *P. greggii* Engelm con variables de diámetro normal, diámetro de copa, volumen, altura total y diámetro de ramas. Por otro lado, Pascual-López *et al.* (2020) en *P. chiapensis* (Mart.) encontraron similitud en diámetro, altura y volumen en 31 árboles seleccionados; en tanto que Sáenz-Romero *et al.* (2012) encontraron variabilidad entre altitudes con respecto a características de conos y semillas para *P. devoniana* Lindl. en Michoacán, siendo en las poblaciones con elevaciones bajas quienes presentaron valores por debajo de la media: conos menos curvos y atenuados, vainas faciculares más cortas y de tonos menos oscuros.

Del número total de variables, el PCA se enfoca en reducir e inclusive crear nuevas variables siempre y cuando estén correlacionadas entre sí (Quindemil y Rumbaut 2019). La correlación mostró el 87.46% de la variabilidad existente entre los árboles; resultados similares obtuvieron Gutiérrez *et al.* (2016) y Fernández-Chuairey *et al.* (2022) con valores entre 79.4 y 88.36% para árboles sobresalientes de caoba (*Swietenia macrophylla* King). Al respecto, Vallejos *et al.* (2010) mencionan que el volumen por árbol es una característica importante para la producción de biomasa y madera de calidad. Dentro del PCA se observa la sección A en la cual se encuentran los árboles con las mejores características morfológicas y de sitio; estos individuos presentan alturas, diámetros, longitud de fuste limpio, edad y calidad de sitio alto, características para ser considerados como candidatos para árboles selectos (Balcorta-Martínez y Vargas-Hernández 2004, Muñoz *et al.* 2011, Gutiérrez *et al.* 2016), convenientes para colecta de germoplasma e inclusive huertos semilleros, ya que garantizan una producción de semilla de mejor calidad que un rodal sin selección; además de considerar las condiciones ambientales óptimas para la especie (Pascual-López *et al.* 2020) y la restauración de ecosistemas forestales propuesto por Thomas *et al.* (2014) con especies nativas.

Es importante señalar que la longitud de fuste limpio se correlacionó negativamente ( $r=-0.58$ ) con la precipitación media anual; esto probablemente debido a la relación inversa entre altitud vs. temperatura y a la relación positiva entre altitud vs. precipitación. Hernández *et al.* (2014) demostraron que hay poca variación en largo y ancho de conos con relación a características morfológicas entre árboles de *P. chiapensis*; esto se puede deber a que es una especie atípica y presenta una baja diversidad genética (Del Castillo *et al.* 2009).

Mendizábal-Hernández *et al.* (2015) señalan que el potencial de producción de semillas y las características morfológicas de *P. chiapensis* están influenciados por diversos factores, principalmente ambientales como son la lluvia, el viento y la humedad; la temperatura mostró correlación significativa con la altura de fuste limpio y algunos diámetros de los árboles sobresalientes; lo que coincide con Bautista-Santiago *et al.* (2018) que reportan correlaciones de las temperaturas media, máxima y mínima. Por lo anterior, se considera que al tener algún cambio en la temperatura tendrían consecuencias de adaptación en cuanto a condiciones de sitio y características morfológicas (Antúnez *et al.* 2017, Bautista-Santiago *et al.* 2018). Las características de los árboles sobresalientes y las condiciones climáticas de los sitios en que crecen presentaron gran variabilidad; sin embargo, pocas son estadísticamente significativas. Esto se debe a que las variables morfológicas con baja asociación con características climáticas indican escasa relación lineal, coeficientes pequeños y no significativos (Martínez-Antúnez *et al.* 2013). Al respecto, se ha demostrado que en árboles forestales (en condiciones naturales) hay variación en la producción de semillas y está asociada con factores climáticos (Alba-Landa *et al.* 2005, Pérez *et al.* 2020); es decir, esta variación en las características morfológicas se relaciona a condiciones ambientales (Pérez *et al.* 2020), influyendo la precipitación influye en la magnitud de incremento vegetativo de las plantas (Antúnez *et al.* 2017). Se sabe que el incremento en la cantidad y calidad de conos por árbol se ve asociada con valores altos en características morfológicas (Binotto *et al.* 2010, Sáenz-Romero *et al.* 2012, Bautista-Santiago *et al.* 2018).

## CONCLUSIONES

El volumen es una característica importante en la producción de madera de calidad; de los 30 individuos seleccionados inicialmente para las dos especies, al utilizar el volumen promedio como criterio de selección, se determinó que seis árboles de *Pinus chiapensis* y siete individuos para *P. douglasiana* son fenotípicamente superiores; mientras que al comparar las características morfológicas-de sitio-climáticas, se seleccionaron 10 individuos superiores para *P. chiapensis* y seis de *P. douglasiana*. La selección fenotípica con respecto a las características dasométricas en campo es una etapa inicial para elegir árboles candidatos óptimos, pero al incorporar criterios de análisis en volumen, índice de sitio, guías de densidad y características climáticas permite una selección más estricta y nos garantiza una producción de semilla de mejor calidad que un rodal sin selección; además, constituye una alternativa para el inicio de un programa de mejoramiento genético forestal.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación estuvo financiada por el proyecto “Eficiencia reproductiva de fenotipos superiores de dos especies de *Pinus*” clave 15075.22-P del Tecnológico Nacional de México en 2022. Agradecemos las facilidades otorgadas por las autoridades comunales de San Juan Lachao, así como a la ing. Inés G. Vásquez Barranco.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## LITERATURA CITADA

- Alba-landa J, Ramírez JM, Cortina HSB (2005) Potencial de producción de semillas de *Pinus greggii* Engelm. en tres cosechas de una población ubicada en Carrizal Chico, Zacualpan Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 7(2): 37-40.
- Ambrocio-Hernández CA, Rodríguez-Ortiz G, Velasco-García MV, Hernández-Hernández A, Enríquez-del Valle JR, Velasco-Velasco VA (2022) Mejoramiento genético en árboles forestales comerciales de México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 9(1): 137-147.
- Antúnez P, Wehenkel C, López-Sánchez CA, Hernández-Días JC (2017) The role of climatic variables for estimating probability of abundance of tree species. *Polish Journal of Ecology* 65(3): 324-338. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2017.65.3.002>
- Aparicio-Rentería A, Viveros-Viveros H, Hernández-Villa J, Sáenz-Romero C, Ruiz-Montiel C, Pineda PJA (2020) Zonificación altitudinal de *Pinus patula* a partir de conos y semillas en la sierra de Huayacocotla, Veracruz, México. *Madera y Bosques* 26(2): e2621962. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621962>
- Aragón PRD, Rodríguez OG, Vargas HJJ, Enríquez del VJR, Hernández HA Campos AGV (2020) Selección fenotípica y características reproductivas de *Pinus pseudostrubus* var. *oaxacana* (Mirov) S. G. Harrison. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(59): 118-140. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.700>
- Balcorta-Martínez HC, Vargas-Hernández JJ (2004) Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10(1): 13-19.
- Bautista-Santiago P, Antúnez P, Santiago-García W, Valenzuela-Encinas C (2018) Variables ambientales que afectan la densidad de diez especies forestales en la Sierra Norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(47): 209-228. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.160>
- Binotto AF, Lúcio AD, Lopes SJ (2010) Correlation between growth variables and the Dickson quality index in forest seedlings. *CERNE* 16(4): 457-464.
- Capilla-Dinorin E, López-Upton J, Jiménez-Casas M, Rebollo-Camacho V (2021) Características reproductivas y calidad de semilla en poblaciones fragmentadas de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44(2): 211-219.
- Castellanos-Acuña D, Sáenz-Romero C, Lindig-Cisneros RA, Sánchez-Vargas NM, Lobbit P, Montero-Castro JC (2013) Variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrubus*, *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>
- Chávez-Pascual EY, Rodríguez-Ortiz G, Carrillo-Rodríguez JC, Enríquez-del Valle JR, Chávez-Servia JL, Campos-Angel GV (2013) Factor de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1273-1284.
- Cornejo OEH, Bucio ZE, Gutiérrez VB, Valencia MS Flores CL (2009) Selección de árboles y conversión de un ensayo de procedencias a un rodal semillero. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(2): 87-92.
- Del Castillo RF, Trujillo AS, Sáenz-Romero C (2009) *Pinus chiapensis*, a keystone species: Genetics, ecology, and conservation. *Forest Ecology and Management* 257: 2201-2208.
- Escobar-Sandoval MC, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J, Espinoza-Zaragoza S, Borja-de la Rosa A (2018) Parámetros genéticos de calidad de madera, crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 24(2): e2421595. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595>
- Farfán VE, Jasso MJ, López UJ, Vargas HJ, Ramírez HC (2002) Parámetros genéticos y eficiencia de la selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(3): 239-246.

- Fernández-Chuairey L, Rangel-Montes de Oca L, Varela-Nualles M, Pino-Roque JA, del Pozo-Fernández J, Lim-Chang NU (2022) Analisis Analysis of main components, an effective tool in agricultural technical sciences. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 31(1): 101-107.
- Fuentes-Amaro SL, Rodríguez-Laguna R, Razo-Zárate R, Meza-Rangel J, Jiménez-Casas M, López-Zepeda GA (2020) Energía germinativa en árboles selectos de *P. patula* Schl. et Cham. Revista Iberoamericana de Ciencias 7(1): 69-78.
- Gómez GJP, Domínguez-Domínguez M, Martínez-Zurimendi P, Ramírez VG (2018) Ecuaciones de volumen para estimar la producción maderable de *Hevea brasiliensis* Müell Arg. en plantaciones de etapas adulta y vejez. Madera y Bosques 24(2): e2421867. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421867>
- Gutiérrez VBN, Cornejo OEH, Rodríguez SB, López UJ, Gutiérrez VMH, Gómez CM Flores MA (2016) Selección de árboles sobresalientes de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en un rodal natural mediante métodos multivariados. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 7(37): 51-64.
- Hernández JL, Mendizábal HL, Alba LJ, Ramírez GEO Cruz JH (2014) Variación de conos de *Pinus chiapensis* (Mart.) Andressen Procedente de Atzalan, Veracruz, México. Foresta Veracruzana 16(1): 35-40.
- Martínez RJA, Cruz CF, Gurrola AJG Nájera LJA (2020) Potencial productivo de conos y semillas de dos especies del género *Pinus*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 11(58): 26-46. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.592>
- Martínez-Antúnez P, Wehenkel C, Hernández-Días JC, González-Elizondo MS, Corral-Rivas JJ, Pinedo-Álvarez A (2013) Effect of climate and physiography on the density of trees and shrubs species in Northwest México. Polish Journal of Ecology 61(2): 283-295.
- Melchor MJJ, Romero HAE, Rodríguez AM, Salazar GJG (2010) Tabla de volumen para *Pinus chiapensis*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto técnico. Núm. 50. 31 pp.
- Mendizábal-Hernández LC, Alba-Landa J, Hernández JL, Ramírez-García EO, Rodríguez-Juárez MC (2015) Potencial de producción de semillas de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. Foresta Veracruzana 17(2): 47-52.
- Mondino VA, Pastorino MJ, Gallo LA (2019) Variación altitudinal de caracteres fenológicos y crecimiento inicial en condiciones controladas entre poblaciones de *Nothofagus pumilio* provenientes del Centro-Oeste de Chubut, Argentina. Bosque 40(1): 87-94. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002019000100087>
- Morales GE, López UJ, Vargas HJJ, Ramírez HC, Gil MA (2013) Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. Revista Fitotecnia Mexicana 36(2): 155-162.
- Muñoz-Flores HJ, Hernández-Zaragoza O, Hernández-Zaragoza P, García-Magaña JJ, Barrera-Ramírez R (2015) Comparación del crecimiento de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus patula* Schl. et Cham. en plantaciones comerciales establecidas en Hueyapan, Puebla. Foresta Veracruzana 17(1): 1-8.
- Muñoz FHJ, Orozco GG, Coria AVM, Muñoz VYY, García MJ (2011) Manejo de un área semillera de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Abies religiosa* (H.B.K.) Schltdl. et Cham. y selección de árboles superiores en Michoacán, México. Foresta Veracruzana 13(2): 29-36.
- Muñoz FHJ, Orozco GG, Coria AVM, Muñoz VYY, García MJ (2012) Comparación de dos métodos de selección de árboles superiores en un área semillera de *Abies religiosa* (H. B. K) Schltdl. Et Cham. en Michoacán, México. Foresta Veracruzana 14(1): 1-8.
- Muñoz FHJ, Prieto RJA, Flores GA, Alarcón BM, Sáenz RJT (2013) Selección de árboles superiores del género *Pinus*. INIFAP 69: 59 p.
- Oliva M, Rimachi Y (2017) Selección fenotípica de árboles plus de tres especies forestales maderables en poblaciones naturales en el Distrito de Molinopampa (Amazonas). Revista de investigación de agroproducción sustentable 1(2): 36-43. <https://doi.org/10.25127/aps.20173.372>
- Pascual-López ML, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle JR, Campos-Angeles GV, Carrillo-Rodríguez JC (2020) Selección de fenotipos de *Pinus chiapensis* en rodales naturales bajo manejo forestal al sur de México. Revista Mexicana de Agroecosistemas 7(2): 96-109.
- Pastrana-Vargas IJ, Espitia-Camacho M, Murillo-Gamboa O (2012) Evaluación del potencial de mejoramiento genético en el crecimiento en altura de *Acacia mangium* Willd. Acta Agronómica 61(2): 143-150.

- Pérez RCM, Fuentes GMW, Geada LG (2020) Capacidad reproductiva de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la unidad de producción de semilla mejorada Marbajita. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 8(2): 333-343.
- Quindemil TEM, Rumbaut LF (2019) Análisis de componentes principales para obtener indicadores reducidos de medición en la búsqueda de información. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud* 30(3): e1374
- Reyes-Esteves GI, López-Upton J, Velasco-García MV, Jiménez-Casas M (2021) 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>
- Reyes-Zurita N, Rincón-Ramírez JA, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle JE, Velasco-Velasco VA, Castañeda-Hidalgo E (2020) Modeling Potential C, N, H Content in Aboveground Biomass with Spectral Data from Sentinel 2a. Preprints 2020030187. <https://doi.org/10.20944/preprints202003.0187.v1>
- Rodríguez-Ortiz G, Aragón-Peralta RD, Enríquez-del Valle JR, Hernández-Hernández A, Santiago-García W, Campos-Angeles GV (2020) Calidad de plántula de progenies selectas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana* del sur de México. *Interciencia* 45(2): 96-101.
- Rodríguez-Ortiz G, José-Hernández Y, Enríquez-del Valle JR, Campos-Angeles GV (2021) Calidad de plántula de árboles seleccionados de *Leucaena esculenta* en sistema agroforestal. *Ciencia ergo-sum* 28(1): e113. <https://doi.org/10.30878/ces.v28n1a7>
- Rodríguez-Vásquez ME, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle JR, Velasco-Velasco VA, Ramírez-Sánchez SE (2018) Caracterización y escarificación de semillas de *Bursera glabrifolia* Kunth colectadas de diferentes árboles semilleros. *Ciencia ergo-sum* 25(2): e16. <https://doi.org/10.30878/ces.v25n2a6>
- Sáenz-Romero C, Aguilar-Aguilar S, Silva-Farías MÁ, Madrigal-Sánchez X, Lara-Cabrera S, López-Upton J (2012) Variación morfológica altitudinal entre poblaciones de *Pinus devoniana* Lindl. y la variedad putativa cornuta en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(13): 17-28.
- Sáenz-Romero C, Rehfeldt GE, Crookston NL, Duval P, Amant R St., Beaulieu J, Richardson BA (2010) Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates of Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102: 595-623. Doi: 10.1007/s10584-009-9753-5.
- Salaya-Domínguez JM, López-Upton J, Vargas-Hernández JJ (2012) Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia* 46(5): 519-534.
- Sánchez VNM, del Castillo SRF (2001) Calidad de estación para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen en el Rincón, Oaxaca, México. *Foresta Veracruzana* 3 (2): 9-12.
- SAS (2014) Programming with Base SAS® 9.4, Second Edition. SAS Institute. Cary, NC. USA. 900 p.
- SE (2016) Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana: Establecimiento de unidades productoras y manejo de germoplasma forestal especificaciones técnicas. NMX-AA-169-SCFI-2016. Diario Oficial de la Federación. Consultado 14 de septiembre 2022. Disponible en <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-169-scfi-2016.pdf>
- SEMARNAT (2010) Norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental de especies nativas de México de flora y fauna silvestre- Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Secretaría de Medio Ambiente y Recurso Naturales. Diario oficial de la Federación, segunda sección, jueves 30 de diciembre de 2010.
- Thomas E, Jalonen R, Loo J, Boshier D, Gallo L, Cavers S, Bordács S, Smith P, Bozzano M (2014) Genetic consideration in ecosystem restoration using native tree species. *Forest Ecology and Management* 333: 66-75.
- Vallejos J, Badilla Y, Picado F, Murillo O (2010) Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. *Agronomía Costarricense* 34(1): 105-119.
- Vargas-Larreta B, Corral-Rivas JJ, Aguirre-Calderón OA, López-Martínez JO, De los Santos-Posadas HM, Zamudio-Sánchez FJ, Treviño-Garza EJ, Martínez-Salvador M, Aguirre-Calderón CG (2017) SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 23(3): 438-455.
- Villegas-Jiménez DE, Rodríguez-Ortiz G, Chávez-Servia JL, Enríquez-del Valle JR, Carrillo-Rodríguez JC (2016) Variación del crecimiento en vivero entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Gayana Botánica* 73(1): 113-123.

Viveros-Viveros H, Camarillo-Luna AR, Sáenz-Romero C, Aparicio-Rentería A (2013) Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Bosque* 34(2): 173-179. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002013000200006>

World Climate (2022) Research on Forest Climate Change: Predicted Effects of Global Warming on Forest and plant Climate Relationships in Western North America and Mexico. <https://charcoal2.cnre.vt.edu/climate/>