



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS
FORESTALES

**PARÁMETROS GENÉTICOS E INTERACCIÓN
GENOTIPO POR AMBIENTE EN DOS ENSAYOS DE
PROGENIES DE *Pinus pseudostrobus* var.
apulcensis EN LA MIXTECA DE OAXACA**



Que como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

APROBADA



Presenta:

BERTARIO SÁNCHEZ ROSALES

Bajo la supervisión de: **LETICIA CITLALY LÓPEZ TELOXA, DRA.**



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2023.

**PARÁMETROS GENÉTICOS E INTERACCIÓN GENOTIPO AMBIENTE EN DOS
ENSAYOS DE PROGENIES DE *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* EN LA
MIXTECA OAXAQUEÑA**

Tesis realizada por Bertario Sánchez Rosales bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Directora



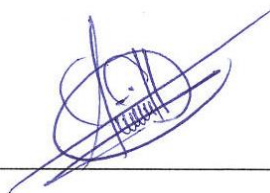
Dra. Leticia Citlaly López Teloxa

Codirector



Dr. Mario Valerio Velasco García

Asesor



M. C. Adán Hernández Hernández

Asesor



Dr. Alejandro Corona Ambriz

CONTENIDO

Lista de tablas.....	V
Lista de figuras	VI
Abreviaturas y siglas utilizadas.....	VII
Dedicatoria	VIII
Agradecimientos.....	IX
Datos biográficos	X
RESUMEN GENERAL	1
GENERAL ABSTRACT.....	2
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
CAPITULO II. SURVIVAL, GROWTH, AND STEM QUALITY OF <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> PROVENANCES NTHE MIXTECA REGION OF OAXACA, MÉXICO ..	13
Summary.....	14
Introduction	15
Materials and Methods.....	16
Tree selection, plant production, and trial establishment	16
Data logging	19
Data analysis.....	19
Results	20
Difference between sites	20
Difference between provenances	21
Discussion	23
Difference between sites	23
Differences between provenances	25
Genotype x environment interaction	27
Conclusions.....	28
List of abbreviations	29
Acknowledgments.....	30
Author Contributions	30
Conflict of interest.....	30
References.....	30
CAPITULO III. PARÁMETROS GENÉTICOS DE CRECIMIENTO Y CALIDAD DE FUSTE DE <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> EN LA MIXTECA, OAXACA, MÉXICO	40

Resumen.....	40
Introducción	41
Materiales y métodos.....	42
Ubicación y establecimiento del ensayo.....	42
Variables evaluadas	43
Análisis estadístico y cálculo de parámetros genéticos	43
Resultados y discusión	45
Variación y control genético	46
Correlaciones genéticas y fenotípicas	50
Conclusiones.....	53
Agradecimientos	54
Bibliografía	54
CAPÍTULO IV. CONCLUSIÓN GENERAL	61

Lista de tablas

Tab. 1- Location and climatic characteristics of <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> provenances established in Yosondúa and Monte Flor, Oaxaca, Mexico.	17
Tab. 2 - Means and comparison of means between sites (Yosondúa and Monte Flor) of survival, growth and stem quality characteristics of <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> in the Mixteca, Oaxaca, Mexico.	20
Tab.3 - Mean values and multiple comparisons of means of survival, growth and stem quality variables of <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> provenances at two sites (Yosondúa and Monte Flor) in the Mixteca, Oaxaca, Mexico.	22
Tab. 1. Valores promedios, mínimos y máximos de variables de crecimiento y calidad de fuste en familias de un ensayo de progenies de <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> en la Mixteca Alta de Oaxaca, México.	46
Tab. 2. Coeficiente de variación genética y heredabilidades de progenies de <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> evaluados en la Mixteca de Oaxaca.	48
Tab. 3. Correlaciones genéticas con error estándar (arriba de la diagonal) y correlaciones fenotípicas con significancia (debajo de la diagonal) entre características de crecimiento y calidad de fuste de un ensayo de progenies de <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> en la Mixteca de Oaxaca.	50

Lista de figuras

Fig. 1 - Location of <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> provenances in three states in Mexico.	17
Fig. 2 - Genotype-by-environment interaction of crown diameter (a), number of whorls (b) and number of branches (c).	23

Abreviaturas y siglas utilizadas

Abreviatura	Significado
ARama	Angulo de Rama
Bif	Bifurcación
°C	grados centígrados
cm	centímetros
CVg	coeficiente de variación genética
DC	diámetro de copa
DRama	diámetro de rama
EE(h ² _i)	error estándar de la heredabilidad individual
et al	y otros
g	gramos
G X A	Genotipo por ambiente
h ² _f	Heredabilidad de medias de familias
h ² _i	Heredabilidad individual
IPA	Incremento periódico en altura
IPDB	Incremento periódico en diámetro de base
L	Litros
m	metros
m ³	Metros cúbicos
MGF	Mejoramiento genético forestal
mm	milímetros
msnm	metros sobre el nivel del mar
Nver	Numero de verticilos
PMA	Precipitación media anual
REML	Máxima Verosimilitud Restringida
RFust	Rectitud de fuste
SAS	Statistical Analysis System
sp	especie
Superv	Supervivencia
TMA	Temperatura media anual
var.	Variedad

Dedicatoria

A mis queridos y apreciables padres: Caritina Rosales López (QPD) y Héctor Sánchez Sánchez por otorgarme la vida, por sus valiosos consejos y enseñarme los buenos valores.

A mis queridos hermanos Alma, Héctor, Manuel, Alejandro, Evaristo y Lupita por su apoyo y sus buenos deseos en el trayecto profesional.

A mis sobrinas (Jazmín, Alejandra y Lizbeth), por momentos muy agradables.

Para la familia Torres Niño, por su bonita amistad y cariño que tienen hacia mí.

Y en general a todas aquellas personas que influyeron positivamente durante mi formación profesional.

Agradecimientos

Al proyecto: “Establecimiento de huertos semilleros asexuales regionales y ensayos de progenie de *Pinus pseudostrobus* para la evaluación genética de los progenitores”. Financiado por el fondo sectorial CONAFOR-CONACYT, con el número de proyecto: 277784.

A la Universidad Autónoma Chapingo que me acepto y brindó el apoyo necesario para terminar la etapa de maestría.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnología (anteriormente Conacyt) por la beca otorgada durante los dos años de estudio y por formar profesionistas de calidad para México y el mundo.

Al Maestro Adán Hernández Hernández por su guía, gran amistad, valiosos consejos que fueron de suma importancia durante mi etapa profesional. Además de sus observaciones puntuales en el desarrollo de la tesis

Al Dr. Mario Valerio Velasco García por brindarme su indispensable apoyo, valiosos consejos y apreciable amistad durante el trayecto de mi formación profesional y desarrollo de tesis.

Al Dr. Martín Gómez Cárdenas por brindar valiosas observaciones, sugerencias y comentarios en el desarrollo del documento de tesis, por permitirme trabajar con los ensayos de progenies, y por supuesto de su apreciable amistad.

A la Dra. Leticia Citlaly López Teloxa por su indispensable apoyo en la etapa final de tesis y del posgrado

A los compañeros de maestría; Pablo, Noé, Alejandro, Miguel y Erick, por su apoyo y amistad que me brindaron durante este periodo.

Al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas por su apoyo en todo momento durante la estancia del posgrado

Al equipo forestal del INIFAP C.E Valles Centrales de Oaxaca: Mary, Yaneth, Feliciano, Nancy, Nataly y a todos los demás compañeros que de alguna manera me brindaron sus valiosos apoyos

A todas las personas que apoyaron de alguna manera directa o indirectamente en mi formación.

¡¡muchas gracias!!

Datos biográficos

Datos personales:

Fecha de nacimiento: 25 de diciembre de 1995

Lugar de nacimiento: Cabecera de Cañada,
Santiago Yosondúa, Oaxaca.

Nacionalidad: mexicana



Formación profesional:

Licenciatura: Ingeniería Forestal,

Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), 2013-2017

Maestría: Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales,
en la Universidad Autónoma Chapingo, 2021-2023.

RESUMEN GENERAL

Parámetros genéticos e interacción genotipo ambiente en dos ensayos de progenies de *pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* en la Mixteca Oaxaqueña¹

La Mixteca Oaxaqueña enfrenta serios problemas de deforestación y erosión de suelo, al punto de considerarse desastre ecológico. Las reforestaciones se deben realizar con procedencias y progenies seleccionadas para estas condiciones. *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* posee cualidades para crecer en sitios restrictivos. Se determinó la diferencia entre sitios y procedencia, la interacción genotipo x ambiente y los parámetros genéticos de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*. En 2018, se estableció en dos sitios (Yosondúa y Monte Flor) un ensayo con 64 familias, correspondientes a ocho procedencias; a cuatro años se evaluó la supervivencia, el incremento y caracteres de calidad de fuste. En análisis de procedencias indicó efecto del sitio, en Yosondúa todas las variables presentaron valores mayores. La procedencia Yolox e Ixtepeji presentaron mayores crecimientos en ambos sitios. En cambio, las procedencias Gutiérrez y Xico presentaron mejores valores de calidad de fuste en ambos sitios. La interacción genotipo x ambiente fue significativa para diámetro de copa, número de ramas y verticilos. A nivel de familias, el coeficiente de variación genética fue amplia (8.01 a 18.84 %). El control genético fue alto para el crecimiento ($h^2_i = 0.42$ a 0.66 , $h^2_f = 0.55$ a 0.63) y baja a alta para calidad de fuste ($h^2_i = 0.01$ a 0.38 , $h^2_f = 0.29$ a 0.55). Se debe cuidar el movimiento de semillas en la región Mixteca, las procedencias Yolox e Ixtepeji parecen prometedoras para las condiciones probadas. Es posible utilizar el crecimiento como criterio de selección en forma independiente y combinada con algunas características de calidad del fuste.

Palabras clave: Incremento, correlaciones genéticas, calidad de fuste.

Tesis de maestría en Ciencias, Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, universidad Autónoma Chapingo

Autor: Bertario Sánchez Rosales¹

Director de Tesis: Dra. Leticia Citlaly López Teloxa

GENERAL ABSTRACT

Genetic parameters and genotype by environment interaction in two progeny trials of *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* in the Mixteca from Oaxaca¹

The Oaxacan Mixteca faces serious problems of deforestation and soil erosion, to the point of being considered an ecological disaster. Reforestation must be carried out with provenances and progenies selected for these conditions. *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* has the quality to grow in restrictive sites. The difference between sites and provenance, the genotype x environment interaction and the genetic parameters of *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* has been determined. In 2018, a trial with 64 families corresponding to eight provenances, was established in two sites (Yosondúa and Monte Flor); survival, growth, and stem quality characteristics at four years were evaluated. In the analysis of provenances, the effect of the site was indicated; in Yosondúa all the variables presented higher values. The Yolo and Ixtepeji provenance showed greater growth in both sites. On the other hand, the Gutiérrez and Xico provenances presented better stem quality values in both sites. The genotype x environment interaction was significant for crown diameter, number of branches, and whorls. At the family level, the coefficient of genetic variation was wide (8.01 to 18.84 %). Genetic control was high for growth ($h^2_i = 0.42$ to 0.66 , $h^2_f = 0.55$ to 0.63) and from low to high for stem quality ($h^2_i = 0.01$ to 0.38 , $h^2_f = 0.29$ to 0.55). The movement of seeds in the Mixteca region must be taken care of, the Yolo and Ixtepeji provenances seem promising for the conditions tested. Using growth as a selection criterion independently and combined with some stem quality characteristics is possible.

Keywords: Increase, genetic correlations, stem quality.

Master of Science Thesis, Master of Science in Forest Science, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Bertario Sánchez Rosales¹

Advisor: Dra. Leticia Citlaly López Teloxa

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

La deforestación es un problema grave en México, en el periodo de 1976 a 2007 se deforestaron 16 575 924 ha y 15 695 140 ha de vegetación primaria pasó a ser vegetación secundaria (Rosete-Vergés et al. 2014). Por otra parte, la agricultura, la extracción de recursos naturales y la urbanización provocaron que 76 % del territorio del país tenga algún grado de erosión hídrica, de la cual 6.79 % es extrema, 5.79 % fuerte, 26.7 % moderada y 37.06 % leve (Bolaños et al. 2016).

Aunque el estado de Oaxaca no es uno de los más afectados por la erosión (Bolaños et al. 2016), la Mixteca Oaxaqueña es una de las regiones que, debido a procesos históricos de deforestación y sobrepastoreo, presenta uno de los problemas más drásticos de erosión de suelos y escases de agua (Martínez-Pérez 2006; Santiago-Mejía et al. 2018). Se estima que 17 % de la superficie de esta región presenta erosión severa, y en 83 % la erosión va de ligera a moderada (Martínez-Pérez 2006). En algunos sitios, la pérdida de la vegetación seguida de la erosión es tan intensa que se consideran como zonas de desastre ecológico (Martínez-Pérez 2006). Debido a la escasa cobertura vegetal, actualmente la erosión hídrica sigue siendo uno de los principales factores que contribuyen a la degradación y pérdida de suelo (Santiago-Mejía et al. 2018); siendo esta la tasa de pérdida de suelo más alta a nivel internacional (200 t ha⁻¹) (Guerrero-Arenas et al. 2010). Aunado a lo anterior, la contaminación ambiental es otro problema que afecta la región Mixteca Oaxaqueña; en 2012 esta región alcanzó el segundo lugar a nivel estatal en la generación de residuos sólidos, por lo que la degradación ambiental y de los recursos naturales se clasifica en el rango de crítico inestable a crítico (Ruiz 2020). Todos estos problemas ocasionan la pérdida de la biodiversidad en la región (Aguilar-Santelises & del Castillo 2012), lo que ha planteado graves preocupaciones en términos de conservación y restauración del ecosistema.

Ante estos problemas que enfrenta la región Mixteca de Oaxaca, en las últimas tres décadas la organización comunitaria, la conciencia social y las instituciones (asociaciones civiles y gubernamentales) han desencadenado una transición

forestal (Hernández-Aguilar et al. 2021). Para restaurar el suelo, las comunidades de la Mixeca Oaxaqueña realizaron obras de conservación de suelos, tales como sistema loma-bordo (Santiago-Mejía et al. 2018), zanjas trincheras y gaviones (Boege & Carranza 2009). Sin embargo, una de las actividades más acertadas para recuperar suelos en esta región es la reforestación.

Esta actividad inició desde 1982, primero con *Eucaliptus* spp., la cual no tuvo mucho éxito, unos años después se plantaron *Fraxinus* spp. *Cupressus* spp. *Alnus acuminata* Kunth y *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* (sinonimia *P. oxacana* Mirov.), siendo esta última la que tuvo mayor éxito (Becerra et al. 1993, Boege & Carranza 2009). Asimismo, fue necesario combinar la plantación de árboles con obras de conservación de suelos como zanjas trincheras profundas, terrazas sucesivas y estabilización de taludes (Ramírez López et al. 2011; Sandoval-García et al. 2021). En la década de 1990 se introdujo *P. greggii* Engelm.; esta especie, a pesar de que su introducción es cuestionable por ser exótica en la región, actualmente es la que predomina en los bosques plantados (reforestación) en la región Mixteca Alta (Plancarte Barrera 2015) por su alta supervivencia, buen crecimiento y su capacidad de producir materia orgánica (Valencia et al. 2006, López-Ortiz et al. 2017). Actualmente *P. greggii* var. *australis* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* son las especies que más se usan para la reforestación en la Mixteca Alta de Oaxaca (Plancarte Barrera 2015); aunque en menor proporción y con buen éxito se plantan *Cercocarpus fothergilloides*, *Alnus acuminata*, *Quercus* sp. *Pinus douglasiana*, *P. cembroides*, *Agave potatorum*, *Dodonaea viscosa*, *Baccharis heterophylla*, *Juniperus* sp. (Plancarte Barrera 2015).

Como resultado de lo anterior, en algunas comunidades, el promedio anual de la cobertura forestal incrementó 2.73 %, en el periodo comprendido entre 1990 a 2018 (Hernández-Aguilar et al. 2021); mientras que, en otras comunidades el incremento total fue de 6.6 % en el período de 1995 al 2016 (Sandoval-García et al. 2021).

El éxito de las reforestaciones con *P. greggii* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, en cierta medida se debe a la selección de procedencias. Al final de la década de 1990, el INIFAP estableció los primeros ensayos de procedencias de estas especies en

Tlacotepec Plumas y Magdalena Zahuatlán, sitios con condiciones de suelo contrastantes (Valencia et al. 2006). Como resultado de estas investigaciones se determinó que *P. greggii* var. *australis* es la que tiene mayor supervivencia y crecimiento en las condiciones de la región, entre las cuales las procedencias El Madroño y El Piñon son las más recomendables (Valencia et al. 2006, Ortiz-Ibarra et al. 2022) Asimismo, para *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* se determinó que la procedencia Los Molinos Capulalpam se recomienda para realizar reforestaciones debido a que es superior a otras en cuanto a la cobertura de copa, lo que generará mayor materia orgánica al suelo (Ortiz Mendoza 2015). La selección es una herramienta básica del mejoramiento genético forestal (MGF) (Zobel & Talbert 1988, White et al. 2007) para obtener árboles con características adecuadas para cierto fin, en este caso para obtener genotipos tolerantes a las condiciones de suelo de la región Mixteca de Oaxaca.

El crecimiento y adaptación de los árboles en diferentes entornos y su capacidad de tolerar estrés abiótico es relevante en términos ecológicos e industriales (Cortés et al. 2020), lo cual se puede mejorar aplicando MGF (Murillo et al, 2017). El MGF busca producir poblaciones forestales con características fenotípicas y genéticas superiores, con mayor productividad, resistentes a enfermedades y que sean adaptadas a diferentes ambientes, el proceso es continuo y repetitivo que puede llevar muchos años o incluso décadas para lograr mejoras significativas en características genéticas de una población (Acquaah 2012, Lebedev et al. 2020). Mediante el MGF se obtienen fuentes conocidas de semilla, plántulas o propágulos para establecer nuevas plantaciones o reforestaciones mejoradas (Williams- Claire et al. 2007). Asimismo, el MGF se enfoca en asegurar y mantener una amplia variabilidad genética y obtener ganancias genéticas de manera progresiva a largo plazo (Murillo et al., 2017; Mukasyaf et al., 2021).

El MGF es un ciclo recurrente de selección y consta de varias etapas, comienza en la población base (rodales naturales o plantaciones con procedencia conocida), donde se realiza la selección fenotípica de árboles superiores (población de selección) de acuerdo a la característica de interés (restauración de suelos,

producción de madera, producto no maderable, etc), después de otra selección se establece la población de producción (huertos semilleros, huertos clonales), sobre esta población se realiza otra selección adicional para generar la población de cruzamiento, los individuos generados por esta población de cruzamiento generan una nueva población base y reinicia el ciclo de MGF para una segunda generación (Zobelt & Tarbelt 1988, White et al . 2007). En el ciclo de MGF, las pruebas genéticas juegan un papel crucial, entre ellos los ensayos de procedencias y progenies son los más usados (Zobelt & Tarbelt 1988, White et al. 2007).

Los ensayos de procedencias se establecen para evaluar el origen geográfico (procedencia) de cierta especie, tienen como objetivo determinar cuál de las procedencias probadas responde mejor (de acuerdo con la característica de interés) en las condiciones donde se establecen los ensayos; después de la evaluación se determinan las procedencias aptas con las cuales se debe plantar en las condiciones probadas (Zobelt & Tarbelt 1988, White et al. 2007, Weber & Montes 2012, Koskela et al. 2014). Por el contrario, los ensayos de progenies se establecen para evaluar al árbol superior (árbol madre) de acuerdo a la característica de interés para mejorar; estos ensayos son cruciales para avanzar en el ciclo de mejoramiento genético. Con los resultados de los ensayos de progenies se toman decisiones para seleccionar individuos que pasarán de ser población de selección a población de producción y población de cruzamiento (Zobelt & Tarbelt 1988, White et al. 2007 Weber & Montes 2012, Koskela et al. 2014). Mediante los ensayos de progenies se obtienen parámetros genéticos, los cuales son cruciales para conocer la variabilidad genética de la población de mejora (p.e. población de selección), el grado de control genético de la característica de interés y la asociación genética entre características (p.e. crecimiento vs producción de follaje), además permite conocer la ganancia genética producto de la cierta intensidad de selección (Sotolongo et al. 2005, Lantz 2008). Otro de los aspectos imprescindibles a estudiar en el proceso de selección de genotipos es la interacción genotipo x ambiente (IGA). LA IGA se refiere a la relación que existe entre genes y el ambiente que afectan el fenotipo de un organismo (Crosas 2012); en especies forestales, la IGA es importante debido a las variaciones ambientales en diferentes zonas de crecimiento, puede ayudar a

seleccionar árboles que se adapten mejor en ambientes contrastantes, lo que mejora la productividad y la supervivencia de plantaciones o reforestaciones forestales.

El éxito de las reforestaciones o plantaciones forestales requiere de la aplicación del MGF (Ray et al. 2022). Por lo anterior, en la región Mixteca de Oaxaca, en 2012 se estableció un ensayo de progenies de *P. greggii* var. *australis* en dos sitios en San Miguel Achiutla, donde se determinó que la altura total, el número de verticilos, la rectitud de fuste y el volumen presentan alto control genético, las variables de crecimiento tuvieron alta correlación genética, lo que permitió identificar individuos superiores que se pueden usar como fuente de semillas para la región (Reyes-Esteves et al. 2021). Asimismo, se encontró que existe interacción genotipo x ambiente, lo que sugiere que tener control y cuidado de no usar la misma semilla para todas las condiciones de la Mixteca Oaxaqueña (Reyes-Esteves et al. 2021).

A pesar de lo anterior, debido a la gran variación de condiciones ambientales tales como elevación, tipo de suelo y clima de la Mixteca Alta de Oaxaca (Hernández-Aguilar et al. 2021, Ortiz-Ibarra et al. 2022); así como por la interacción genotipo por ambiente que se ha determinado en las especies ensayadas (Valencia et al. 2006, Reyes-Esteves et al. 2021), es necesario seguir seleccionando especies, procedencias y progenie que tengan éxito en la región. Por lo anterior, y con la finalidad de usar especies nativas para realizar reforestaciones en la región Mixteca Oaxaqueña (Plancarte Barrera 2015), en 2018 se estableció un ensayo de procedencias-progenies de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* en dos sitios (Santiago Yosondúa y San Juan Monte Flor) en la región Mixteca de Oaxaca. El ensayo de conformó de 64 familias de árboles superiores seleccionados con fines maderables, correspondientes a ocho procedencias. La intención es determinar procedencias y familias aptas en supervivencia y crecimiento para que sirvan como fuente de semillas para realizar reforestaciones en la región. En la presente investigación, a nivel de procedencias se estudió el efecto del sitio, las diferencias entre procedencias dentro de cada sitio y se verificó la interacción genotipo x ambiente de la supervivencia, crecimiento y características de calidad del fuste. A nivel de

progenies, se estudió la variación genética, el control genético y la correlación genética entre variable.

Objetivo General

- Evaluar la supervivencia y parámetros genéticos en crecimiento y la calidad de fuste progenies de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* establecidos en la Mixteca de Oaxaca.

Objetivos específicos

- Conocer las diferencias entre sitios, entre procedencias dentro de cada sitio y verificar la existencia de interacción genotipo x ambiente en la supervivencia, crecimiento y en variables de calidad del fuste en procedencias de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, establecidas en dos sitios de la región Mixteca de Oaxaca.
- Determinar el control genético en variables de crecimiento y calidad de fuste, y nivel de asociación genética en las variables estudiadas en un ensayo de progenies de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* a cuatro años de plantación.

Bibliografía

- Acquaah (2012). In Principles of Plant Genetics and Breeding. Plant breeding, Plant genetics 2 ed. 732 p.
- Aguilar-Santelises R & del Castillo RF (2013). Factors affecting woody plant species diversity of fragmented seasonally dry oak forests in the Mixteca Alta, Oaxaca, Mexico. Revista Mexicana de Biodiversidad 84: 575-590. doi: 10.7550/rmb.30458
- Becerra F, Castellanos J, Ruiz M (1993). Recuperación de áreas degradadas en la Mixteca Oaxaqueña. In: Memoria del Primer Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales. Saltillo, Coah. México. 60 p.
- Boege E & Carranza T (2009). La agricultura sostenible campesino-indígena frente a la desertificación de la Mixteca Alta. En Boege, Eckart y Carranza, Tzinnia, Agricultura sostenible campesino-indígena, soberanía alimentaria y equidad de género. México (México): PIDASSA; Pan para el Mundo; Xilotl, SC.

- Bolaños MA, Paz F, Cruz CO, Argumedo JA, Romero B, VM, de la Cruz JC (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34(3): 271-288. URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300271&lng=es&tlng=es.
- Cortés AJ, Restrepo-Montoya M, Bedoya-Canas LE (2020). Modern strategies to assess and breed forest tree adaptation to changing climate. *Frontiers in Plant Science* 11, 583323.
- Crossa J, (2012). From Genotype × Environment Interaction to Gene × Environment Interaction, *Current Genomics* 13 (3). DOI: doi.org/10.2174/138920212800543066
- Guerrero-Arenas R, Jiménez Hidalgo E, Santiago Romero (2010). La transformación de los ecosistemas de la Mixteca Alta oaxaqueña desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno. *Ciencia y Mar* 14(40): 61-68.
- Hernández-Aguilar JA, Duran E, de Jong W, Velázquez A, Pérez-Verdín G (2021). Understanding drivers of local forest transition in community forests in Mixteca Alta, Oaxaca, Mexico. *Forest Policy and Economics* 131: 102542. DOI: doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102542
- Hernández-Aguilar JA, Hernández-Gómez W, González-Cubas R (2021). Especies nativas para manejo de la erosión de suelos en la región Mixteca Alta, Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 8(1): 1-12.
- Koskela J, Vinceti B, Dvorak W, Bush D, Dawson IK, Loo J, Kjaer ED, Navarro C, Padolina C, Bordács S, Jamnadass R, Graudal L, Ramamonjisoa L (2014). Utilization and transfer of forest genetic resources: A global review. *Forest Ecology and Management* 333: 22–34. DOI: doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.017
- Lantz CW (2008). Genetic Improvement of Forest Trees. *Woody plant seed manual*. 37–58 DOI: doi.org/10.1016/b978-0-12-535902-3.50007-5

- Lebedev VG, Lebedeva TN, Chernodubov AI, Shestibratov KA (2020). Genomic selection for forest tree improvement: methods, achievements and perspectives. *Forests* 11: 1190.
- López-Ortiz M, Sánchez-García RB, Contreras-Hinojosa JR, Armenta-Bojórquez AD, Félix-Herrán JA (2017). Captación de carbono en suelos asociados a *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus oaxacana* Mirov. en la Mixteca Alta, Oaxaca. *Ecología Aplicada* 16(2): 127-133.
- Martínez-Pérez G, Orozco-Segovia A, Martorell C (2006). Efectividad de algunos tratamientos pre-germinativos para ocho especies leñosas de la Mixteca Alta Oaxaqueña con características relevantes para la restauración. *Botanical Sciences* (79), 9-20.
- Mukasyaf AA, Matsunaga K, Tamura M, Iki T, Watanabe A, Iwaizumi MG (2021). Reforestation or genetic disturbance: a case study of *Pinus thunbergii* in the Iki-no-Matsubara coastal forest (Japan). *Forests* 12(1): 72.
- Murillo O, Espitia M, Castillo C (2017). Conceptos Del Mejoramiento Genético Forestal. Comayagua (Honduras): Universidad Nacional de Ciencias Forestales. 89 p.
- Ortiz Mendoza R (2015). Análisis del crecimiento de *Pinus oaxacana* Y *Pinus greggii* en ambientes degradados de la Mixteca Oaxaqueña. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. p 77.
- Ortiz-Ibarra A, Molina-Luna NG, Martínez-Ojeda E, Martínez-López J (2022). La percepción local de la transformación del paisaje en San Juan Teposcolula, Oaxaca México. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(Supl.1): 1–11. DOI: doi.org/10.31910/rudca.v25.nsupl.1.2022.2144
- Plancarte Barrera A (2015). Reforestación con especies nativas en la Mixteca oaxaqueña. Proyecto Mixteca Sustentable. 80 p.
- Ramírez López A, Navarro Garza H, Pérez Olvera A, Cetina Alcalá VM (2011). Experiencia organizativa para la reforestación con *Pinus oaxacana* Mirov. en suelos degradados de la Mixteca oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(7): 57-70.

- Ray D, Berlin M, Alia R, Sanchez L, Hynynen J, González-Martínez S, Bastien C (2022). Transformative changes in tree breeding for resilient forest restoration. *Frontiers in Forests and Global Change* 5. 1005761.
- Reyes-Esteves GI, López-Upton J, Velasco-García MV, Jiménez-Casas M (2021). Genetic parameters of a progeny trial of *Pinus greggii* Engelm. ex Parlatore var. *australis* Donahue y López in the Mixteca Alta of Oaxaca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 28(1): 75–88. DOI: doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.10.067
- Rosete-Vergés FA, Pérez-Damián JL, Villalobos-Delgado M, Navarro-Salas EN, Salinas-Chávez E, Remond-Noa R (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques* 20(1): 21-35.
- Ruiz MA (2020). Estado actual de la contaminación ambiental presente en la Mixteca Oaxaqueña. *Journal of Negative and No Positive Results* 5(5): 535-553. DOI: <https://dx.doi.org/10.19230/jonnpr.3257>
- Sandoval-García R, Cubas González R, Jiménez Pérez J (2021). Multitemporal analysis of the change in land cover in the Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(66). DOI: doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.816
- Santiago-Mejía BE, Martínez-Menes MR, Rubio-Granados E, Vaquera-Huerta H, Sánchez-Escudero J (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema Lama-Bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo* 15(2): 275–288. DOI: doi.org/10.22231/asyd.v15i2.796
- Sotolongo SR, Geada LG, Cobas LM (2005). Mejoramiento Genético Forestal. Manejo de Semillas Forestales Nativas de La Sierra de Ecuador y Norte Del Perú. 13–28 p.
- Valencia S, Velasco MV, Gómez M, Ruíz M, Capo MÁ (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.

- Weber JC, Montes SC (2012). Provenance and progeny trials. In: Dawson I, Harwood C, Jamnadass R, Beniest J (eds.) Agroforestry tree domestication: a primer. The World Agroforestry Centre, Nairobi, Kenya. pp. 64-69.
- White TL, Adams WT, Neale DB (Eds.). (2007). Forest genetics. In Nature (Vol. 167, Issue 4254).
- Williams-Claire G, James L, Hamrick PO (2007). Tree Improvement. Forestry encyclopedia. 3.
- Zobel BJ, Talbert JT (1988). Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. México D.F., México. Ed. Limusa. 545p.

CAPITULO II. SURVIVAL, GROWTH, AND STEM QUALITY OF *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* PROVENANCES IN THE MIXTECA REGION OF OAXACA, MÉXICO

Bertario Sánchez-Rosales¹, Mario Valerio Velasco-García², Adán Hernández-Hernández³, Martín Gómez-Cárdenas⁴ y Leticia Citlaly López-Teloxa⁵

¹ Master's Student in Forestry and Environmental Sciences, Chapingo Autonomous University. E-mail: bertarioforest@gmail.com

² Researcher at the National Center for Disciplinary Research in Conservation and Improvement of Forest Ecosystems. National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research. E-mail: velasco.mario@inifap.gob.mx

³ Researcher at the Central Valleys Experimental Field of Oaxaca. National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research. E-mail: hernandez.adan@inifap.gob.mx

⁴ Researcher at the Uruapan Experimental Field. National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research. E-mail: gomez.martin@inifap.gob.mx

⁵ Professor-researcher. Chapingo Autonomous University. E-mail: citlaly_lo@hotmail.com

Autor de correspondencia: velasco.mario@inifap.gob.mx

Keywords: Periodic increment, branch diameter, branch angle, interaction, stem straightness, bifurcation.

Summary

The Mixteca region of the state of Oaxaca in Mexico is experiencing the dual drastic problems of deforestation and soil erosion. To combat this, reforestation can be undertaken, using previously tested species and genotypes. *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* is valued for its ability to grow under restricted conditions, and so we tested it in the study region. Our aim was to determine differences between sites, between provenances within each site, and the genotype x environment interaction (GEI) on survival, growth, and stem quality. Eight provenances were established at two sites (Yosondúa and Monte Flor). A periodic increment in basal diameter and height, crown diameter, stem straightness, bifurcation, whorls, number of branches, branch diameter, and branch angle was determined, four years after planting. All the variables presented higher values ($p < 0.001$) at Yosondúa than at Monte Flor, except for survival ($p = 0.2583$). At both sites, all the variables indicated differences between the provenances ($p \leq 0.028$), except for survival and bifurcation ($p \geq 0.998$) at Yosondúa, whereas at Monte Flor, number of branches, bifurcation, and survival did not indicate any differences ($p \geq 0.9191$). The Yolox provenance presented higher increments in basal diameter, height, and crown diameter at both sites. The best values for stem quality were presented by the Gutiérrez (branch diameter, stem straightness, bifurcation) and Xico (number of branches, branch diameter, whorls) provenances at both sites. The GEI was significant for crown diameter, number of branches, and whorls. Our findings suggest that it is essential to consider the origin of the germplasm and the environmental conditions of a site before planting in the Mixteca region of Oaxaca.

Introduction

The Mixteca region in the state of Oaxaca, Mexico, faces significant ecosystem degradation issues. The fragility of the forests and soils in this region, marked by high levels of deforestation and erosion, is so severe that multiple forest areas are considered ecological disaster zones (Ramírez et al. 2010). In response to this environmental problem, in some locations in the Mixteca region, efforts have been made, since 1997, to establish and evaluate provenances and progenies of *Pinus oaxacana* Mirov, *P. greggii* Engelm., and other native species suitable for these soils (Valencia et al. 2006, Plancarte 2015, Ortiz et al. 2021, Reyes-Esteves et al. 2022). Despite these efforts, due to the diverse environmental conditions, variations in elevation, and soil disturbance levels in the Mixteca region (Hernández-Aguilar 2021, Ortiz-Ibarra et al. 2022), as well as the existence of genotype x environment interactions (GEIs) (Valencia et al. 2006, Reyes-Esteves et al. 2022), it is essential to identify suitable sources and progenies with native species for each specific site (Zobel & Talbert 1988, White et al. 2007).

In Mexico, there is a wide variety of native species of plant with the potential for restoring soil (Ríos et al. 2008, Hernández-Aguilar et al. 2021). Among these is *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* (synonymous with *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* Martínez and *P. oaxacana* Mirov). It is one of the finer pines in Mexico, primarily found in the Sierra Madre Oriental and the Sierra Madre del Sur (Farjon et al. 1997, Perry 1991). In Oaxaca, this species inhabits the Mixteca, Sierra Juárez, and Sierra Sur regions (Gernandt & Pérez-de la Rosa 2014). This species holds economic importance due to the quality and workability of its wood, while its

sawmill cellulose residue can be used in bioenergy production (Machuca-Velasco et al. 2012, Vásquez-García et al. 2016). In addition, it has ecological significance, being used to restore degraded soils and being efficient at capturing carbon (Chávez-Pascual et al. 2017). Due to its broad altitudinal distribution range (1,600–3,200 m above sea level [a.s.l.]), *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* has been planted in areas facing issues of deforestation and soil loss (Ramírez et al. 2010, Plancarte 2015, Vásquez-García et al. 2016).

To test this species in the Mixteca region, we aimed to obtain an understanding of the differences between sites and between provenances within each site, and to verify the existence of GEI in the survival, growth, and stem-quality variables of *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* provenances. These were established at two sites in the Mixteca region. The research hypotheses were: 1) there is a site effect on survival, growth, and stem-quality traits due to environmental differences between sites; 2) within each site, provenances have different responses due to genetic differences among them; and 3) plants from the same provenance perform differently in each planting site due to the GEI caused by environmental differences in the sites.

Materials and Methods

Tree selection, plant production, and trial establishment

In July 2017, 64 trees of *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* were selected from four locations in Oaxaca, three in Chiapas, and one in Veracruz (Fig. 1, Tab. 1) based on them having superior phenotypic characteristics for timber production (Zobel & Talbert 1988). Seed collection and processing took place between November 2017

and February 2018. Plant production was carried out in rigid 310-cm³ containers, using a substrate composed of 50% peat moss (Flora-gard®), 25% perlite, and 25% vermiculite, supplemented with Osmocote Plus (5 kg m⁻³ of substrate). During nursery cultivation, foliar fertilization was applied using Folim 00-40-40 (0.16 g L⁻¹ of water) and Aminofit® (2 ml L⁻¹ of water) once a week.

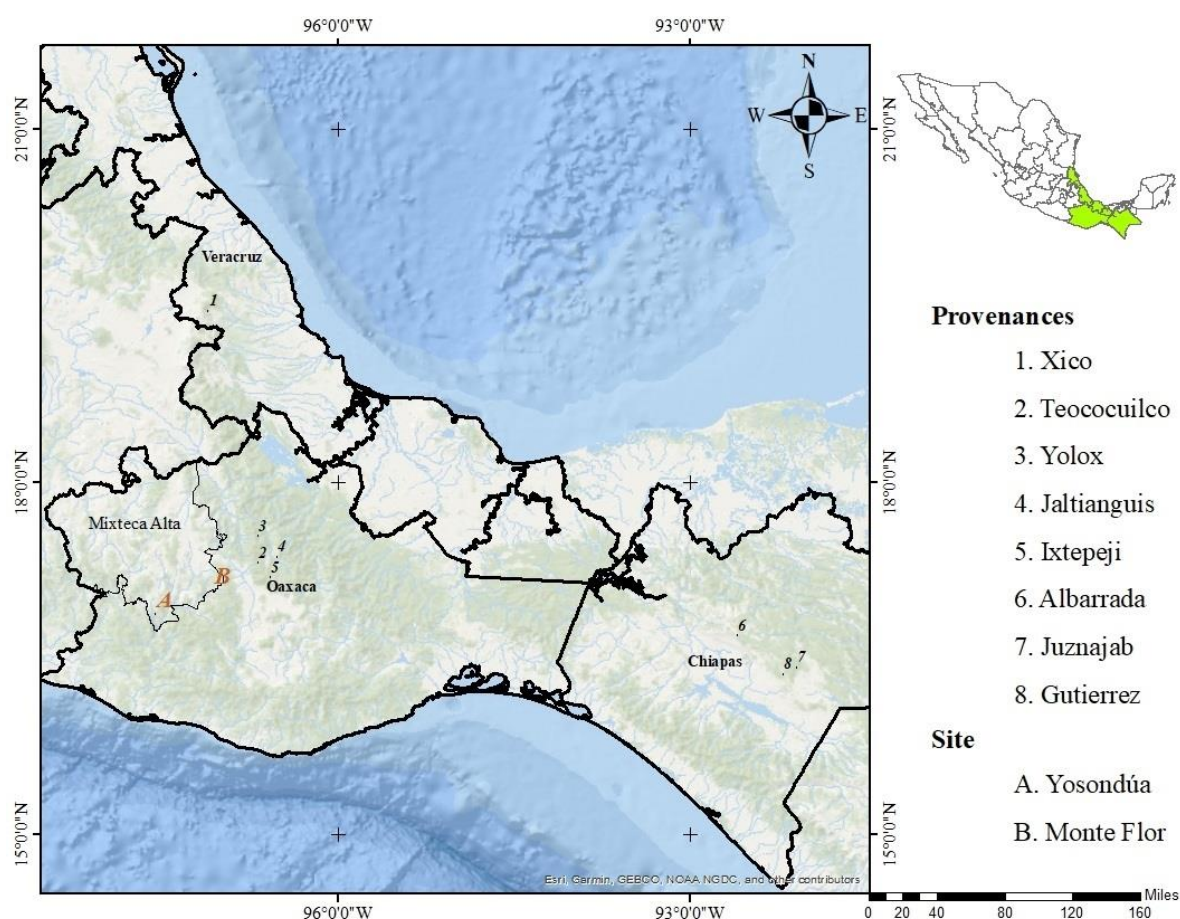


Fig. 1 - Location of *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* provenances in three states in Mexico.

Tab. 1- Location and climatic characteristics of *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* provenances established in Yosondúa and Monte Flor, Oaxaca, Mexico.

Provenance	State	Latitude (N)	Longitude (O)	Elevation (msnm)	MAT (°C)	MAP (mm)
Xico	Veracruz	-97.1077013	19.4510001	2875	12.7	1208.8
Teococuilco	Oaxaca	-96.6809913	17.3036493	2601	14.0	1201.2
Yolox	Oaxaca	-96.6846944	17.5307315	2558	12.4	1555.7
Jaltianguis	Oaxaca	-96.5215833	17.3589387	2478	14.2	1231.8
Ixtepeji	Oaxaca	-96.5783542	17.1812130	2457	15.2	1062.1
Albarrada	Chiapas	-92.6015342	16.6850235	2250	15.2	1309.9
Juznahab	Chiapas	-92.0992220	16.4144305	2047	15.7	1277.3
Gutiérrez	Chiapas	-92.2105463	16.3572127	1887	16.3	998.0

MAT: mean annual temperature, MAP: mean annual precipitation (USDA Forest Service, 2023).

In 2018, two trials were established with eight provenances, each consisting of eight-month-old plants, in Santiago Yosondúa (16°52.344'N, 97°3.520'W, 2385 m a.s.l.) and San Juan Monte Flor (17°4.120'N, 97°3.520'W, 1872 m a.s.l.). Yosondúa experienced a lower mean annual temperature (14.9 vs. 18.4°C) and higher mean annual precipitation (1,108 vs. 723 mm) than Monte Flor (USDA Forest Service 2023). In Yosondúa, the soil was clay loam (sand 67.0%, silt 18.0%, and clay 34.8%), while in Monte Flor, it was sandy loam (33.6% sand, 31.6% silt, and 15.0% clay). The soil in Yosondúa had higher inorganic nitrogen (N) (18.4 vs. 16.19 mg kg⁻¹), phosphorus (P) (2.26 vs. 2.13 mg kg⁻¹), potassium (K) (208.00 vs. 43.00 mg kg⁻¹), and organic matter (2.09 vs. 0.84%) contents, but lower calcium (Ca) (1,667.50 vs. 1,939.42 mg kg⁻¹) and pH (6.03 vs. 7.04) than Monte Flor. The experimental design for both plantations was a randomized complete block with 20 replications (blocks) and experimental units consisting of one plant per family. The spacing between the plants was 3 x 3 m, and to avoid edge effects, a strip of plants was placed around the experiment.

Data logging

The initial data were the basal diameter and height, which were measured in November 2018. In January 2022, the survival rate was evaluated and the final data were obtained for the basal diameter, height, and crown diameter. The periodic increment in basal diameter and height was obtained by subtracting the initial data from the final data. In January 2022, stem-quality data were also obtained, including stem straightness, bifurcation, whorls, number of branches, branch diameter, and branch angle. The stem straightness was determined qualitatively, using 1 = very crooked stem, 2 = crooked stem, 3 = slightly crooked stem, and 4 = straight stem. Bifurcation was evaluated as present (1) or absent (0). The diameter and angle of the branches were measured in two branches (one branch with a larger diameter and the other with a smaller diameter) in the whorl closest to 1.0 m from the ground.

Data analysis

Assumptions of data normality and the homogeneity of variances were tested using the Shapiro–Wilk and Levene tests, respectively. As none of the variables met both assumptions, RT4 non-parametric tests of variance and multiple comparisons (Conover 2012) were conducted using the SAS statistical package, version 9.4 (SAS Institute Inc. 2004). To assess the difference between the sites and the effect of the site x provenance interaction, the following model was employed:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + B_{j(i)} + P_k + SP_{ik} + \varepsilon_{ijk} \text{_____} 1$$

where Y_{ijk} corresponds to the observation value, μ is the overall mean, S_i is the effect of the i th site, B_j is the fixed effect of the j th block, P_k is the random effect of the k th provenance, SP_{ik} corresponds to the interaction of the j th site and the k th provenance, and ε_{ijk} is the error of the effects, $i = 1, 2$ sites, $j = 1, 2, \dots, 20$ blocks, $k = 1, 2, \dots, 8$ provenances. The difference between the provenances at each site was obtained from the same model, without considering the effect of site or interaction.

Results

Difference between sites

The survival, growth, and stem-quality variables showed significant differences ($p < 0.001$) between the sites. The Yosondúa site had higher values for these variables than the Monte Flor site, except for the percentage of plants with bifurcations, where Monte Flor had the highest value (Tab. 2).

Tab. 2 - Means and comparison of means between sites (Yosondúa and Monte Flor) of survival, growth and stem quality characteristics of *Pinus pseudotrobus* var. *apulcensis* in the Mixteca, Oaxaca, Mexico.

Variables	Yosondúa	Monte Flor
Survival (%)	88.00a	43.00b
Periodic increment in basal diameter (cm)	5.66a	4.30b
Periodic increment in height (m)	1.62a	1.24b
Crown diameter (m)	1.36a	1.15b
Stem straightness	2.99a	2.64b
Bifurcation (%)	4.00a	12.00b
Number whorls	4.76a	4.75b
Number branches	18.97a	14.56b
Branch diameter (cm)	1.89a	1.58b
Branch insertion angle (°)	87.41a	51.72b

Different letters in the same row indicate statistical difference ($p \leq 0.05$) between sites.

Difference between provenances

At the Yosondúa site, all the variables showed significant differences between the provenances ($p \leq 0.0005$), except for survival ($p = 0.9279$) and bifurcation ($p = 0.2249$). Regarding growth, the Yolox provenance had higher values of periodic increment in height and basal diameter, and crown diameter, while the Xico provenance had the lowest values of these variables (Tab. 3). For the stem-quality variables, the Gutiérrez provenance had the lowest values for branch diameter, and had straighter stems, and a greater branch insertion angle. However, it also had a greater number of whorls and more branches. Likewise, the Xico provenance had a lower number of whorls and branches. Finally, Yolox, Teococuico, and Jaltianguis had thicker branches, a smaller angle of branch insertion, and less-straight stems, respectively (Tab. 3).

At Monte Flor, all the variables presented significant differences ($p \leq 0.0476$) between provenances, except for survival ($p = 0.9191$), bifurcations ($p \geq 0.6083$), branch diameter ($p = 0.1943$), and number of branches ($p = 0.1445$). Regarding the growth variables, Yolox had the highest values of periodic increment in basal diameter, periodic increment in height, and crown diameter, while Xico presented the lowest values of these variables (Tab. 3). Regarding the stem-quality variables, the Gutiérrez, Xico, and Juznajib provenances had straighter stems. Likewise, Xico and Juznajib had the lowest number of whorls and the highest angle of branch insertion, respectively. Teococuico had fewer straight shafts, Yolox the highest number of whorls, and Xico the best branch insertion angle (Tab. 3).

Tab.3 - Mean values and multiple comparisons of means of survival, growth and stemquality variables of *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* provenances at two sites (Yosondúa and Monte Flor) in the Mixteca, Oaxaca, Mexico.

Provenance	Surv (%)	Growth			Stem quality					
		IPBD (cm)	PIH (m)	CD (m)	SS	Bif (%)	Nh	BN	BD (cm)	BA (°)
	Yodondúa Site									
Yolox	93a	6.09a	1.86a	1.48a	3.1a	2.0a	4.7bc	19.3cd	2.0d	57.2cd
Ixtepeji	90a	5.98ab	1.68b	1.48ab	2.9ab	5.0a	4.7cbd	19.4cd	1.9bcd	56.8cd
Juznajab	95a	5.85bc	1.69b	1.33cde	3.1a	8.0a	5.0cd	20.4de	1.8ab	61.6ab
Teococuilco	87a	5.77bcd	1.61b	1.37cd	3.0ab	6.0a	4.7bcd	18.6bc	1.9cd	55.3d
Jaltianguis	87a	5.61bcd	1.61b	1.39bc	2.8b	5.0a	4.5b	17.7b	1.9cd	56.5cd
Gutiérrez	92a	5.45cd	1.62b	1.27de	3.1a	0.0a	5.4e	21.1e	1.8a	62.5a
Albarrada	85a	5.46d	1.60b	1.27e	3.1a	2.0a	5.0d	20.1cd	1.8abc	59.5bc
Xico	88a	4.64e	1.33c	1.07f	3.0a	8.0a	4.8a	15.6a	1.8ab	57.2cd
	Monte Flor Site									
Yolox	43a	4.69a	1.54a	1.23a	2.6bcd	14.0a	5.1c	15.4a	1.8a	51.0a
Ixtepeji	45a	4.28ab	1.33ab	1.16ab	2.7abcd	17.0a	4.5bc	15.1a	1.6a	50.2a
Jaltianguis	42a	4.2abc	1.33ab	1.16abc	2.5cd	12.0a	4.8bc	14.6a	1.7a	54.4a
Juznajab	52a	4.13abc	1.32abc	1.05bc	3.0ab	8.0a	5.1bc	14.7a	1.4a	56.6a
Teococuilco	48a	3.90bc	1.11cd	1.03c	2.5d	12.0a	4.6b	14.1a	1.6a	50.4a
Gutiérrez	30a	3.71c	1.22bcd	1.00bc	3.0a	5.0a	4.8bc	14.8a	1.3a	55.3a
Albarrada	42a	3.67bc	1.18bcd	1.39bc	2.8abc	12.0a	5.0bc	15.0a	1.5a	51.0a
Xico	23a	2.46d	0.93d	0.67d	3.0a	0.0a	3.0a	10.7a	1.3a	36.2b

Surv: survival, PIBD: periodic increment in basal diameter, PIH: periodic increment in height, CD: crown diameter, SS: stem straightness, Bif: bifurcation, Wh: whorls, BN: branches number, BD: branch diameter, BA: branch angle.

Genotype x environment interaction

The GEI was significant ($p \leq 0.0435$) for crown diameter, whorls, and number of branches. The Albarrada provenance was more interactive for crown diameter, while Yolox and Jaltianguis were more interactive in number of branches. For

whorls, Yolo, Jaltianguis, Gutiérrez, and Teococuilco all had the most interactive provenances (Fig. 2).

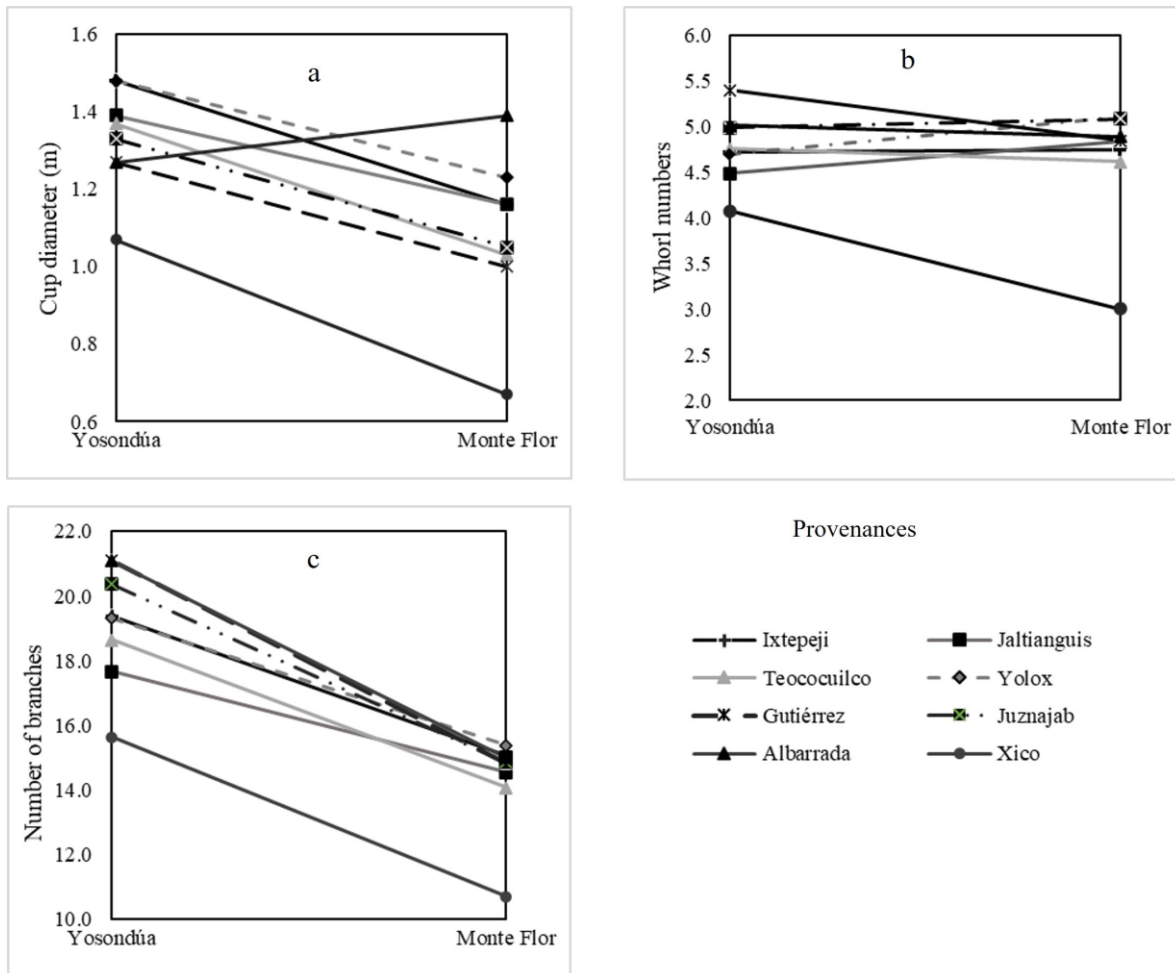


Fig. 2 - Genotype-by-environment interaction of crown diameter (a), number of whorls (b) and number of branches (c).

Discussion

Difference between sites

Differences between the sites indicated that the provenances responded differentially to specific sites in the Mixteca region. This accords with what has been reported in previous studies for *P. oaxacana* (Ortiz 2015) and *P. greggii* (Valencia et al. 2006, Reyes 2020, Ortiz et al. 2021). Differences between the

sites, in terms of survival, growth, and stem-quality characteristics, were due to differences in soil fertility, climate, and the altitude of the sites (Valencia et al. 2006, Ivković et al. 2015, Li et al. 2015). In Michoacán, *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* had higher survival and growth at higher than lower elevation sites (Viveros-Viveros et al. 2005). The organic matter and inorganic N, P, and K contents were higher at Yosondúa than at Monte Flor. Also, the Yosondúa site was at a higher elevation and the mean annual precipitation was higher than at Monte Flor. Previous studies in the Mixteca region have found that differences between the sites in terms of survival and growth were due to differences in soil pH, the percentage of organic matter, and the total available N (Valencia et al. 2006, Velasco-Velasco et al. 2012, Ortiz et al. 2021). In addition, we attributed the low survival and growth of the provenances at Monte Flor has been attributed to damage caused by ants of the genus *Atta*. These ants feed on needles and buds, decreasing growth and even causing tree death when the damage is severe (Jaffe 1986, Cibrián 2016).

Here, we also demonstrated that environmental differences between plantation sites can influence stem-quality variables (Sáihl et al. 1990, Budeanu et al. 2012). In general, the stem-quality variables showed the same trend as growth—higher values at Yosondúa, lower at Monte Flor. However, bifurcation had an opposite trend, which could indicate that the more restricted environment at Monte Flor caused a greater number of bifurcated plants. For example, a deficiency of some nutrients can cause the death of the main buds and consequently a greater proportion of bifurcated plants (Andrade et al. 1995, Turner et al. 2021). In tropical

tree species, differences between sites in the number of bifurcations has been attributed to climatic differences and the type of soil at the site, but in a restricted environment, the number of bifurcations is often lower than at sites with better environmental conditions (Hernández-Hernández et al. 2019).

Differences between provenances

At both sites, survival did not differ between the provenances, possibly due to the wide intra-provenance variation at each site. However, this finding is contrary to that from another study of the same species at two localities in the Mixteca region (Ortiz 2015). At Yosondúa, the survival of all the provenances (88.2 to 100%) was similar to that reported from two sites in the Mixteca region in 17-year trials (Ortiz 2015), whereas at Monte Flor, all the provenances had lower survival rates.

Likewise, the survival of all the provenances at Yosondúa was similar, while at Monte Flor, they were lower than those of the provenances and progenies of *P. greggii* tested at other sites the Mixteca region (Valencia et al. 2006, Reyes-Esteves et al. 2022).

At both sites, the Yolo and Ixtepeji provenances had the highest growth rates, while the Xico grew less well, despite the differences in elevation of the sites. This suggests that, at neither site was growth influenced by the altitude of the provenances, which is similar to what was found for *Pinus patula*, where the relationship between growth and altitude of the populations was weak and sometimes not significant (Sáenz-Romero et al. 2011a, 2011b). By contrast, provenance altitude can influence growth in other species (Viveros-Viveros et al. 2005, 2006, Hernández-Hernández et al. 2019). The low response in the Xico

provenance was attributed to the effect of latitudinal displacement, this provenance having shifted more than 250 km south. Therefore, climatic factors might have been involved in its growth response (Bojaxhi & Toromani 2017). In support of this, Xico is one of the provenances that prefers a lower mean annual temperature and plantation in warmer (trial) sites.

Stem characteristics are important in the selection of provenances because they provide information on the future wood quality (Valencia-Manzo & Vargas-Hernández 2001, Escobar-Sandoval et al. 2018). If the objective is sawtimber production, trees with good growth and shafts with high-quality wood are required (Escobar-Sandoval et al. 2018). Shafts that are not straight, have bifurcations, abundant whorls, and branches, branches of larger dimensions, and smaller insertion angles are undesirable because they reduce the sawtimber quality (Davel et al. 2005, Hernández-Hernández et al. 2019). In addition, they reduce productivity, and increase costs, and production time (Diniz et al. 2020). In this regard, at both sites, the fastest-growing provenances produced the poorest trunk quality, whereas the opposite seemed to be the case with the slowest-growing provenances. The (fastest-growing) YoloX provenance produced the largest branch diameters and number of whorls, and the lowest angle of branch insertion at Yosondúa, whereas at Monte Flor, the trunks were twisted to slightly twisted and there were high numbers of whorls, which could represent poor wood quality. Xico produced a lower number of whorls at both sites, a lower number of branches at Yosondúa, and straighter shafts at Monte Flor, representing better-quality wood. The Gutiérrez provenance, with its low growth values at Yosondúa, produced branches with smaller diameters and higher angles, albeit with a large number of

whorls and branches. This might have been expected due to the high correlation between diameter and height growth with stem-quality characteristics in conifers (Vargas-Hernández et al. 2003, Codesio & Fernández-López 2008).

Genotype x environment interaction

For some variables, the provenances responded differently at each site, demonstrating the existence of a GEI (Zobel & Talbert 1988, White et al. 2007, Burdon 1977, Ivković et al. 2015). This hindered the early selection of provenances (Hernández-Hernández et al. 2019) for the variety of environmental conditions in the Mixteca region. However, understanding the GEI has allowed the planning of, or guidance in the use of, materials that perform well at specific sites (Zobel & Talbert 1988, White et al. 2007) in this region.

The GEI for survival determined in this work contrasts with that obtained for this variable in provenances of *P. greggii* tested at other sites in the same region (Valencia et al. 2006). Likewise, the GEI between basal diameter and height growth in *P. greggii* (Valencia et al. 2006, Reyes 2020) is contrary to that determined in this study. Other species, such as *P. patula* (Salaya et al. 2012) and *Pinus radiata* (Raymond 2011, Li et al. 2015) also presented a GEI between diameter and height in other regions. Contrastingly, no GEI has been reported for *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* (Viveros-Viveros et al. 2005). In our work, among the characteristics of stem quality, only the number of branches and whorls presented a GEI. This partially supports *P. greggii* in the Mixteca region, where there was no GEI for the number of growth cycles, stem straightness, and branch diameter, as opposed to the number of whorls and the angle of branch insertion

(Valencia et al. 2006, Reyes 2020). In general, the growth characteristics of *Pinus* present high levels of GEI compared to the stem-quality characteristics, such as the size, angle, and straightness of the branches (Gapare et al. 2012, Li et al. 2017, Reyes 2020). At local and regional scales, soil characteristics and topography determine the GEI, whereas at larger scales, temperature and precipitation are the determining factors (Li et al. 2015, 2017). Therefore, the GEI determined here was attributed to differences in the soil physical and chemical properties, mean annual temperature, and altitude (Raymond 2011, Li et al. 2017).

Conclusions

Our results indicate that the survival, growth, and stem-quality characteristics of *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* varied at each site, likely due to differences in the climatic and soil conditions. At the Monte Flor site, low survival appears to have been the result of more restricted conditions in this location. Therefore, for the success of plantations in the Mixteca region, it is crucial to consider the origin of the germplasm and the environmental conditions of the planting site.

Regarding growth, the Yolo and Ixtepeji provenances were the most suitable, and they can be used for plantations at sites with environmental characteristics similar to those of the trial sites. By contrast, the Xico provenance showed the lowest performance due to its extensive latitudinal displacement. Therefore, it is not recommended to make extensive germplasm movements from the north to the south. Provenances with higher growth exhibited lower stem quality, and vice versa. This is associated with the positive relationship between growth and whorls, branch diameter, branch number, and branch insertion angle.

There was a GEI in the growth traits and stem quality. The Albarrada provenance presented differences in crown diameter, Yolox and Jaltianguis in branch diameter, and Yolox, Jaltianguis, Gutiérrez, and Teococuilco in whorls, all of which were attributed to the soil and climatic properties at each site, thus confirming the GEI effect. This suggests that variables that show interaction should be considered when planting at specific sites.

List of abbreviations

The following abbreviations have been used throughout the text:

- Mean annual temperature (MAT).
- Mean annual precipitation (MAP).
- Survival (Surv).
- Periodic increment in basal diameter (PIBD).
- Periodic increment in height (PIH).
- Crown diameter (CD).
- Stem straightness (S
- Bifurcation (Bif).
- Whorls (Wh).
- Branches number (BN).
- Branch diameter (BD).
- Branch angle (BA).
- Genotype-by-environment interaction (GEI)

Acknowledgments

This investigation is part of the national research project: "Establishment of regional asexual seed orchards and progeny trials of *Pinus pseudostrobus* for genetic evaluation of the parents". Financed by the CONAFOR-CONACYT sectoral fund, project number: 277784.

Author Contributions

BSR conducted the research, conducted the analysis, and wrote the article; MVVG conducted the research, reviewed the analyses, revised and corrected the article; AHH and MGC established the experiment and made corrections to the article. LCLT reviewed the article.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Andrade SC, De Barros NF, Ferreira R, Teixeira JL, Leal PGL (1995). Exigencia y distribución de boro en plantas de eucalipto [Requirement and distribution of boron in eucalypt seedlings]. *Bosque* 16 (1): 53-59. [in Spanish] - doi: 10.4206/bosque.1995.v16n1-05
- Bojaxhi F, Toromani E (2017). Spatial and temporal growth variation of *Pinus heldreichii* Christ. Growing along a latitudinal gradient in Kosovo and Albania. *South-East European Forestry* 8 (2): 85-97. - doi: 10.15177/see-for.17-10
- Budeanu M, Șofletea N, Pârnuță G (2012). Qualitative traits of Norway Spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] depending on first-order branches: evaluation in

comparative trials. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 40 (2): 295-301. -doi.org/10.15835/nbha4028148

Burdon RD (1977). Genetic correlation as a concept for studying genotype-environment interaction in forest tree breeding. *Silvae Genetica* 26:168-175. [Online] URL:
https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1977/Vol._26_Heft_5-6/26_5-6_168.pdf

Chávez-Pascual EY, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle JR, Velasco-Velasco VA, Gómez-Cárdenas M (2017). Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas [Aboveground biomass compartments of *Pinus oaxacana* stands under silvicultural regimes]. *Madera y Bosques* 23 (3): 147–161. [in Spanish] - doi: [10.21829/myb.2017.2331627](https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627)

Cibrián D (2016). Manual para la identificación y manejo de plagas en plantaciones forestales comerciales [Manual for the identification and management of pests in commercial forest plantations]. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México pp: 132-143. [in Spanish] [online] URL:
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?articulo=6043&grupo=43>

Codesio V, Fernández-López J (2008). Juvenile genetic parameter estimates for vigour, stem form, branching habit and survival in three radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) progeny tests in Galicia, NW Spain. *European Journal of Forest Research* 127: 315–325. - doi: [10.1007/s10342-008-0207-9](https://doi.org/10.1007/s10342-008-0207-9)

Conover WJ (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): 432–438. - doi: 10.1002/wics.1216
- Davel MD, Jovanovski A, Bell DM (2005). Densidad básica de la madera de pino oregón y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina Argentina [Wood basic density of the Douglas fir and its relation with growth conditions in the Patagonian Andes, Argentina]. Bosque 26 (3): 55-62. [in Spanish] - doi: 10.4067/S0717-92002005000300006
- Diniz CCC, Junior RT, Goncalves RR, da Silva E, da Silva JCGL, de Oliveira FM, Silva G (2020). Influence of bifurcation on thinning, productivity and harvester production costs of “*Pinus taeda*” I. Australian Journal of Crop Science 14 (8): 1259–1263. - doi: 10.21475/ajcs.20.14.08.p2377
- Escobar-Sandoval MC, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J, Espinosa-Zaragoza S, Borja-de la Rosa A (2018). Genetic parameters for wood quality, growth and branching traits in *Pinus patula* [Genetic parameters for wood quality, growth and branching traits in *Pinus patula*]. Madera y Bosques 24 (2): 1–11. [in Spanish] - doi: 10.21829/myb.2018.2421595
- Farjon JA, Pérez JA, Styles BT (1997). Guía de campo de los Pinos de México y América Central [Field guide to the Pines of Mexico and Central America]. Royal Botanical Garden, Key, UK. pp.70-71. [in Spanish]
- Gapare WJ, Ivković M, Dutkowski GW, Spencer DJ, Buxton P, Wu HX (2012). Genetic parameters and provenance variation of *Pinus radiata* D. Don. ‘Eldridge collection’ in Australia 1: Growth and form traits. Tree Genetics and Genomes 8: 391-407. - doi: 10.1007/s11295-011-0449-4

- Gernandt DS, Pérez-de La Rosa JA (2014). Biodiversity of pinophyta (conifers) in Mexico [Biodiversity of Pinophyta (conifers) in Mexico]. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: S126–S133. [in Spanish] - doi: [10.7550/rmb.32195](https://doi.org/10.7550/rmb.32195)
- Hernández-Aguilar JA, Hernández-Gómez W, González-Cubas R (2021). Especies nativas para manejo de la erosión de suelos en la región mixteca alta, Oaxaca [Native species for soil erosion management in the Mixteca Alta region, Oaxaca]. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 8 (1): 1–12. [online] URL: <https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/articulo-1.pdf>
- Hernández-Hernández ML, Velasco-García MV, López-Upton J, Galán-Larrea R, Ramírez-Herrera C, Viveros-Viveros H (2019). Crecimiento y supervivencia de procedencias de *Enterolobium cyclocarpum* en la costa de Oaxaca, México [Growth and survival of *Enterolobium cyclocarpum* provenances on the coast of Oaxaca, Mexico]. *Bosque* 40 (2): 173-183. [in Spanish] - doi: 10.4067/S0717-92002019000200173
- Ivković M, Gapare W, Yang H, Dutkowski G, Buxton P, Wu H (2015). Pattern of genotype by environment interaction for radiata pine in southern Australia. *Annals of Forest Science* 72 (3): 391–401. -doi: [10.1007/s13595-014-0437-6](https://doi.org/10.1007/s13595-014-0437-6)
- Jaffe K (1986). Control of *Atta* and *Acromyrmex* spp. in pine tree plantations in the Venezuelan Llanos. In: *Fire Ants and Leaf-Cutting Ants*. CRC Press, pp. 409–416. - doi: 10.1201/9780429038266-34
- Li Y, Suontama M, Burdon RD, Dungey HS (2017). Genotype by environment interactions in forest tree breeding: review of methodology and perspectives on research and application. *Tree Genetics and Genomes* 13 (3): 60. - doi: [10.1007/s11295-017-1144-x](https://doi.org/10.1007/s11295-017-1144-x)

- Li Y, Xue J, Clinton PW, Dungey HS (2015). Genetic parameters and clone by environment interactions for growth and foliar nutrient concentrations in radiata pine on 14 widely diverse New Zealand sites. *Tree Genetics and Genomes* 11: 10. - doi: [10.1007/s11295-014-0830-1](https://doi.org/10.1007/s11295-014-0830-1)
- Machuca-Velasco R, Borja-de la Rosa A, Morales-Villalba E, Flores R (2012). Trabajabilidad de la madera de *Pinus oaxacana* Mirov. proveniente de una plantación en el estado de México [Workability of *Pinus oaxacana* Mirov. wood from a plantation in the state of Mexico]. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18 (2): 193–205. - doi: [10.5154/r.rchscfa.2012.01.001](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.001)
- Ortiz MR (2015). Análisis del crecimiento de *Pinus oxacana* y *Pinus greggii* en ambientes degradados de la Mixteca Oaxaqueña [Analysis of the growth of *Pinus oxacana* and *Pinus greggii* in degraded environments of the Oaxacan Mixteca]. Master's Thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. p. 77. [online] URL: <http://eprints.uanl.mx/13926/>
- Ortiz-Ibarra A, Molina-Luna NG, Martínez-y-Ojeda E, Martínez-López J (2022). La percepción local de la transformación del paisaje en San Juan Teposcolula, Oaxaca México [Local perception of landscape transformation in San Juan Teposcolula, Oaxaca Mexico]. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica* 25(Supl.1): e2144. [in Spanish]- doi: [10.31910/rudca.v25.nsupl.1.2022.2144](https://doi.org/10.31910/rudca.v25.nsupl.1.2022.2144)
- Ortiz R, Aguirre OA, Gómez M, Treviño EJ, González MA (2021). Crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en suelos degradados de la Mixteca Alta, Oaxaca [Growth of *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. provenances on

- degraded soils of the Mixteca Alta, Oaxaca]. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12 (64): 4-22. [in Spanish] - doi: [10.29298/rmcf.v12i64.710](https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.710)
- Plancarte A (2015). Reforestación con especies nativas en la Mixteca Oaxaqueña [Reforestation with native species in the Oaxacan Mixteca]. Proyecto Mixteca Sustentable AC, Oaxaca, México. p. 80. [in Spanish] URL: <https://proyectomixtecasustentableac.org/wp-content/uploads/2019/05/Ref-con-Esp-Nat-en-Mixt-Oax-2.pdf>
- Perry JP (1991). The pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, Oregon, USA. pp. 146-150.
- Ramírez A, Garza HN, Pérez A, Manuel V, Alcalá C (2010). Experiencia organizativa para la reforestación con *Pinus oaxacana* Mirov. en suelos degradados de la Mixteca Oaxaqueña [Organization experience for a *Pinus oaxacana* Mirov. reforestation in degraded soils of the Oaxacan Mixteca]. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2 (7): 57-70. [in Spanish] – doi: [10.29298/rmcf.v2i7.560](https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.560)
- Raymond CA (2011). Genotype by environment interactions for *Pinus radiata* in New South Wales, Australia. *Tree Genetics & Genomes* 7(4): 819–833. - doi: [10.1007/s11295-011-0376-4](https://doi.org/10.1007/s11295-011-0376-4)
- Reyes-Esteves GI, López-Upton J, Velasco-García MV, Jiménez-Casas M (2022). Genetic parameters of a progeny trial of *Pinus greggii* Engelm. ex Parlatores var. *australis* Donahue y López in the Mixteca Alta of Oaxaca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 28 (1): 75–88. - doi: [10.5154/r.rchscfa.2020.10.067](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.10.067)

Reyes GI (2020). Parámetros genéticos e interacción genotipo x ambiente de un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *australis* [Genetic parameters and genotype x environment interaction from a progeny assay of *Pinus greggii* var. *australis*]. Master's thesis, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. p. 74. [online] URL: <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/4378?locale-attribute=es>

Ríos EDL, De Hoogh R, Návar JJ (2008). Ensayos de especies con pinos piñoneros en el nordeste de México [Species trials with stone pines in northeastern Mexico]. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 14 (2): 97-104. [online] URL: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v14n2/v14n2a4.pdf>

Sáenz-Romero C, Ruiz-Talonia LF, Beaulieu J, Sánchez-Vargas NM, Rehfeldt GE (2011a). Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. Revista Fitotecnia Mexicana 34 (1): 19–25. - doi: [10.35196/rfm.2011.1.19](https://doi.org/10.35196/rfm.2011.1.19)

Sáenz-Romero C, Beaulieu J, Rehfeldt EG (2011b). Altitudinal genetic variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, México, in growth chambers simulating global warming temperatures. Agrociencia 45 (3): 399-411. [online] URL: <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/887/887>

Såihl EG, Persson B, Prescher E (1990). Effect of provenance and spacing on stem straightness and number of stems with spike knots in *Pinus sylvestris* L. - Northern Sweden and countrywide models. Studio Forestalin Suecica 184. p. 16. [online] URL: <https://core.ac.uk/reader/11696300>

Salaya-Domínguez JM, López-Upton J, Vargas-Hernández JJ (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula* [Genetic and environment variation in two progeny tests of *Pinus patula*]. Agrociencia 46 (5): 519-534. [online] URL: <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/973/973>

SAS Institute Inc (2004). SAS/STAT 9.1 User's guide. SAS Institute. Cary, NC, USA. p. 4979.

Turner J, Knott J, Green P, Turner S (2021). Boron nutritional management in Australian forest plantations. Trees, Forests and People 5. 100120. - doi: 10.1016/j.tfp.2021.100120

USDA Forest Service (2023). Custom Climate data request. Web site. URL: <https://charcoal2.cnre.vt.edu//climate/customData/>

Valencia S, Velasco MV, Gómez M, Ruíz M, Capo MÁ (2006). Ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en dos localidades de la mixteca alta de Oaxaca, México [Provenance test of *Pinus greggii* Engelm. at two locations in the high Mixteca of Oaxaca, México]. Revista Fitotecnia Mexicana 29 (1): 27–32. [in Spanish] [online] URL: <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/29-1/4a.pdf>

Valencia-Manzo S, Vargas-Hernández JJ (2001). Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula* [Genetic correlations and simultaneous selection for growth and wood density in *Pinus patula*]. Agrociencia 35 (1): 109–120. [online] URL: <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/95/95>

- Vargas-Vargas JJ, Adams WT, Joyce DG (2003). Quantitative genetic structure of stem form and branching traits in *Douglas-fir* seedlings and implications for early selection. *Silvae Genetica* 52: 36-44. [online] URL: https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/2003/Vol._52_Heft_1/52_1_36.pdf
- Vásquez-García I, Cetina-Alcalá VM, Campos-Bolaños R, Casal-Ángeles LF (2016). Evaluación de plantaciones forestales en tres comunidades de la mixteca Alta Oaxaqueña [Assessment of forest plantations in three communities of the Mixteca Alta Oaxaqueña region]. *Agroproductividad* 9 (2): 12–19. [in Spanish] [online] URL: <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/716>
- Velasco-Velasco VA, Enríquez-del Valle JR, Rodríguez-Ortiz G, Campos-Ángeles GV, Gómez-Cárdenas M, García-García ML (2012). Evaluación de procedencias de *Pinus greggii* Engelm ex.Parl. en plantaciones de la Mixteca Oaxaqueña [Assessment of *Pinus greggii* Engelm. ex Parl provenances in plantations of the Oaxacan Mixteca]. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(9): 41-50. [in Spanish] – doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i9.534>
- Viveros-Viveros H, Sáenz-Romero C, López-Upton J, Vargas-Hernández JJ (2005). Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en campo [Altitudinal genetic variation in plant growth of *Pinus pseudostrobus* Lindl. in field testing]. *Agrociencia* 39 (5): 575–587. [online] URL: <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/421/421>

- Viveros-Viveros, Sáenz-Romero C, Vargas-Hernández J, López-Upton J (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México [*Pinus pseudostrobus* provenance variation tested in two sites in Michoacán, México]. Revista Fitotecnia Mexicana 29 (2): 121-126. [in Spanish] [online] URL: <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/29-2/4a.pdf>
- White TL, Adams WT, Neale DB (2007). Forest Genetics. CABI Publishing. Cambridge, MA, USA. p. 682.
- Zobel BJ, Talbert JT (1988). Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. México D.F., México. Ed. Limusa. p. 545.

CAPITULO III. PARÁMETROS GENÉTICOS DE CRECIMIENTO Y CALIDAD DE FUSTE DE *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* EN LA MIXTECA, OAXACA, MÉXICO

Resumen

La región Mixteca Oaxaqueña presenta intensa deforestación y degradación de suelos. Una alternativa es seleccionar el material genético para establecer reforestaciones exitosas. El estudio de parámetros genéticos permite definir las estrategias de mejoramiento genético forestal para esta problemática. El objetivo fue estimar la heredabilidad, correlaciones genéticas y fenotípicas en características de crecimiento y calidad de fuste de 64 familias de polinización libre de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*. A cuatro años se evaluó el incremento periódico de altura y de diámetro basal, el diámetro de copa, rectitud de fuste, el número, diámetro y ángulo de inserción de ramas. Todas las variables presentaron diferencias entre familias ($p \leq 0.0016$); el coeficiente de variación genética fue de 8.01 a 18.84 %. La heredabilidad individual (h^2i) de las características de crecimiento fue de 0.42 a 0.66; mientras que, la heredabilidad de medias de familias (h^2f) fue de 0.55 a 0.63. La h^2i de las características de calidad de fuste fue de 0.01 a 0.38 y la h^2f fue 0.29 a 0.55. Las correlaciones genéticas (r_g) entre variables de crecimiento fueron altas y positivas ($r_g \geq 0.857$), mientras que, entre características de calidad del fuste ($r_g = -0.410$ a 0.899) y entre estas con el crecimiento ($r_g = -0.498$ a 0.820) fue muy viable. Los resultados mostraron que es posible utilizar el crecimiento como criterio de selección en forma independiente y combinada con algunas características de calidad del fuste.

Palabras clave: Incremento periódico, heredabilidad, correlaciones genéticas, variación genética.

Introducción

La región Mixteca Oaxaqueña debido a procesos históricos de deforestación y sobrepastoreo, actualmente presenta problemas drásticos de erosión y escases de agua (Martínez et al. 2006; Santiago-Mejía et al. 2018); al grado de que, algunos sitios se consideran como zonas de desastre ecológico (Martínez et al. 2006). Se estima que 17 % de la superficie de esta región presenta erosión severa, y en 83 % la erosión va de ligera a moderada (Martínez et al. 2006). Debido a la escasa cobertura vegetal, actualmente la erosión hídrica se destaca como uno de los principales factores que contribuyen a la degradación y pérdida de suelo (Martínez et al. 2015). Por lo que es urgente el diseño de estrategias para restaurar el ecosistema de esta región.

En ecosistemas gravemente degradados, para asegurar el éxito de los programas de reforestación es vital establecer ensayos para evaluar especies, procedencias y progenies (Aitken 2004), los cuales proporcionan información que facilita seleccionar materiales mejor adaptados y con mayor crecimiento (Zobel & Talbert 1988, White & Adams 2007, Ipinza 2018). En este sentido, como parte de los esfuerzos por determinar material genético apto para reforestar la región, en la década de 1990 se establecieron dos ensayos de procedencias en sitios contrastantes (en Tlacotepec Plumas y Magdalena Zahuatlán), uno con *Pinus oaxacana* Mirov. y otro con *P. greggii* Engelman ex Parlatore var. *greggii* y *P. greggii* Engelman ex Parlatore var. *australis* Donahue & López (Valencia et al. 2006, López et al. 2017). Recientemente en 2014, en San Miguel Achiutla se establecieron en dos sitios un ensayo de progenies de *P. greggii* Engelman ex Parlatore var. *australis* Donahue & López (Reyes-Esteves et al. 2022). Resultado de estos experimentos, se seleccionó material genético con el cual se establecieron reforestaciones exitosas en región (Ramírez et al. 2011, Vázquez-García et al. 2016, Plancarte 2015).

A pesar de la información generada sobre la selección de genotipos para reforestar la Mixteca Oaxaqueña (Valencia et al. 2006, Velasco-Velasco et al. 2012, Villegas-Jiménez et al. 2013, López et al. 2017, Ortiz et al. 2021, Reyes-Esteves et al. 2022),

esta es aún insuficiente debido a la variación de condiciones ambientales en la región (Kapeller et al. 2013, Plancarte 2015); así como por la de interacción genotipo por ambiente que han manifestado los genotipos probados (Valencia et al. 2006, Reyes-Esteves et al. 2022). Además, resulta necesario probar especies nativas de la región, las cuales pueden estar mejor adaptadas y presentar mejores resultados, como es el caso de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* (sinonimia de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* Martínez; *P. oaxacana* Mirov) (Plancarte 2015). Esta especie además de ser potencial para la restauración de suelos degradados (Ortiz 2015, Plancarte 2015), tiene la capacidad de fijar carbono orgánico (López et al. 2017) y su madera es apreciada por su excelente calidad (Machuca-Velasco et al. 2012). Por lo anterior, es necesario seleccionar familias con buena adaptación, crecimiento y calidad de fuste para sitios específicos de la región Mixteca Oaxaqueña, para lo cual, es necesario determinar parámetros genéticos que permiten conocer la variabilidad, el grado de control genético y la relación genética entre las características de interés (White & Adams 2007, Hurel et al. 2021, Reyes-Esteves et al. 2022).

Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: 1) evaluar las diferencias en crecimiento y características de calidad del fuste de progenies de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* establecidos en la Mixteca de Oaxaca, 2) determinar el control genético de las características de crecimiento y calidad del fuste, así como el nivel de asociación genética entre estas características. Las hipótesis planteadas fueron: 1) el crecimiento y las características de calidad de fuste es diferente entre las familias, debido a las diferencias genéticas, 2) existe fuerte control genético en las características de crecimiento y de calidad de fuste y la correlación genética entre las características de crecimiento con las características de calidad de fuste es negativa.

Materiales y métodos

Ubicación y establecimiento del ensayo

En octubre de 2018 se estableció un ensayo de progenies de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, en la comunidad Cabecera de Cañada, municipio de Santiago Yosondúa en la región Mixteca Alta de Oaxaca (16° 52.344' N, 97° 3.520' O), a 2385 m de

elevación, con temperatura media anual de 14.9° C y 1108 mm de precipitación anual. El suelo del sitio es franco arcilloso (33.6, 31.6 y 34.8 % de arena, limo y arcilla, respectivamente), con 2.09 % de materia orgánica y pH de 6.03; el contenido de N, P, K y Ca es 18.4, 2.26, 208 y 1667.5 mg kg⁻¹, respectivamente. El ensayo incluyó 64 familias de polinización libre, provenientes de la Sierra Norte de Oaxaca (42 familias), Sierra Madre de Chiapas (19 familias) y Sierra Madre Oriental en Veracruz (3 familias). El diseño experimental fue de bloques completos al azar, con 20 repeticiones por familia y unidad de experimento de un árbol, con espaciamiento de 3 x 3 metros entre planta (1280 plantas). Para disminuir el efecto de borde se plantó una hilera de árboles de la misma variedad en el contorno del experimento.

Variables evaluadas

En noviembre de 2018 se midió el diámetro basal con un vernier digital y la altura total con un flexómetro. Asimismo, en enero de 2022 se midió el diámetro basal, la altura total y diámetro de copa con un flexómetro; también variables de calidad de fuste: rectitud de fuste, diámetro de ramas, número de verticilos y de ramas, diámetro y ángulo de ramas. Con ambos datos (2018 y 2022) de diámetro basal y altura total se obtuvo el incremento periódico en diámetro de basal (IPDB) e incremento periódico en altura (IPA) mediante la resta de la primera y la última medición. La rectitud de fuste se evaluó de manera cualitativa: muy torcido (1), torcido (2), ligeramente torcido (3) y recto (4). El número de ramas y verticilos se obtuvieron a través de conteo directo. El diámetro y ángulo de ramas se midió con vernier digital y transportador graduado, respectivamente, en dos ramas (la más gruesa y su opuesta) ubicadas a la altura de 1.0 m del nivel del suelo (Reyes-Esteves et al. 2022).

Análisis estadístico y cálculo de parámetros genéticos

El análisis de varianza se realizó con el procedimiento MXED de SAS. Los componentes de varianzas y covarianzas se calcularon a través del procedimiento VARCOMP y con la instrucción máxima verosimilitud restringida (REML), este

procedimiento se aplica cuando no existe un balance adecuado en los datos (Meyer 2007). El modelo del diseño experimental de bloques completos al azar fue:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + F_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde Y_{jk} es el valor de la observación de la j ésima familia en el i ésimo bloque (repetición), μ = media poblacional, B_i = efecto fijo del i -ésimo bloque, F_j = efecto aleatorio de la j -ésima familia, y ε_{jk} es el error de los efectos. $i= 1, 2, \dots, 20$ bloques, $j=1, 2, \dots, 64$ familias.

La heredabilidad individual (h^2_i) y de medias de familias (h^2_f) se obtuvieron con las ecuaciones siguientes (Falconer 2017):

$$h^2_i = 3\sigma_f^2 / \sigma_f^2 + \sigma_e^2$$

$$h^2_f = (3/4 \sigma_f^2) / (\sigma_f^2 + \sigma_e^2 / b)$$

Donde σ_f^2 es la varianza de familias, σ_e^2 la varianza del error y b la media armónica del número de planta por familia.

Para no sobrestimar la heredabilidad, la varianza aditiva ($\sigma_A = 3\sigma_f^2$) se calculó con el coeficiente de determinación genética 3, debido a que las familias provienen de polinización libre y están compuestas por la mezcla de medios hermanos y hermanos completos (Escobar-Sandoval et al. 2018, Reyes-Esteves et al. 2022). El error estándar de la heredabilidad individual [$EE(h^2_i)$] y coeficiente de variación genética (CVg) se calcularon con las ecuaciones siguientes (Falconer 2017):

$$EE(h^2_i) = \left[\left(2(1+nf-1) h^2 \right)^2 / (na(na-1) (nf-1)) \right]^{0.5}$$

$$CV_g = (\sigma_A / \bar{X}) (100)$$

Donde nf es el número de familias, na el número de árboles por familia, σ_A^2 la varianza aditiva y $\bar{X}$ la media general.

El coeficiente de correlación fenotípica entre pares de variables se obtuvo con el coeficiente de correlación de Pearson; mientras que, los coeficientes de correlación genética se estimaron con la ecuación de Falconer (2017):

$$r_{g(XY)} = \frac{COV_{f(X,Y)}}{\sqrt{(\sigma_{f(X)}^2 * \sigma_{f(Y)}^2)}}$$

Donde $\sigma_{f(X)}^2$ y $\sigma_{f(Y)}^2$ son las varianzas de familias X e Y , respectivamente; $COV_{f(X,Y)}$ es la covarianza de familias de esas variables, obtenida mediante la ecuación siguiente (White & Hodge 1989):

$$COV_{X,Y} = \frac{\sigma_{f(X+Y)}^2 - (\sigma_{f(X)}^2 + \sigma_{f(Y)}^2)}{2}$$

Donde $\sigma_{f(X+Y)}^2$ es la covarianza de familias de la variable $X + Y$. El error estándar de la correlación genética se obtuvo con la ecuación siguiente (Falconer & Mackay 1996):

$$EE(r_g) = (1 - r_g^2) \sqrt{\frac{EE(h_{iX}^2)EE(h_{iY}^2)}{2h_{iX}^2 h_{iY}^2}}$$

Resultados y discusión

Todas las características de crecimiento y de calidad de fuste presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.0016$) entre familias (Tab. 1). Las variables de crecimiento presentaron variación fenotípica amplia; los valores promedios fueron 56.65 cm, 1.63 m, y 1.36 m para incremento periódico de diámetro basal, incremento periódico de altura y diámetro de copa, respectivamente, con amplia variación entre familias (Tab. 1). El crecimiento de diámetro basal, de altura y diámetro de copa de este estudio fue similar al crecimiento de procedencias de dos variedades de *P. greggii* plantados en dos sitios en la misma región (Valencia et al. 2006); por el contrario, el crecimiento de diámetro y altura de progenies de *P. greggii* var. *australis* fueron menores y similares, respectivamente (Reyes-Esteves et al. 2022). Estudios con variedades de *P. pseudostrobus* no existen en la región; sin embargo, en Michoacán el crecimiento de diámetro y altura de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* (Viveros-Viveros et al. 2006) y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* (Viveros-Viveros et al. 2005) fue menor al obtenido en este estudio. La variación fenotípica en características de calidad de fuste también fue amplia entre familias (Tab. 1); esto es relevante debido a que influyen en la calidad de madera (Courbet et al. 2012, Ruano et al. 2023); así fenotipos con fustes menos rectos, mayor número de verticilos y ramas, y con ramas más gruesas y con menor ángulo de inserción reducen la calidad de madera (Barszcz et al. 2010, Budeanu et al. 2012).

Información sobre estas características no existen para ambas variedades de *P. pseudostrobus*; sin embargo, el número de verticilos fue menor al de procedencias de *P. greggii* ensayadas en la Mixteca Alta de Oaxaca (Valencia et al. 2006). La rectitud de fuste, número de verticilos y el ángulo de inserción de ramas fueron similares al de progenies *P. greggii* var. *australis* en dos sitios de la Mixteca Alta de Oaxaca (Reyes-Esteves et al. 2022); por el contrario, el diámetro de ramas fue mayor al de *P. greggii* var. *australis* (Reyes-Esteves et al. 2022).

Tab. 4. Valores promedios, mínimos y máximos de variables de crecimiento y calidad de fuste en familias de un ensayo de progenies de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* en la Mixteca Alta de Oaxaca, México.

Variable	Probabilidad	Media	Error Estándar	Promedio por familia	
				Mínimo	Máximo
Incremento periódico de diámetro basal (cm)	<0.0001	5.67	1.45	3.17	6.68
Incremento periódico de altura (m)	<0.0001	1.63	0.50	0.96	2.11
Diámetro de copa (m)	<0.0001	1.36	0.35	0.83	1.73
Rectitud de fuste	0.0016	2.99	0.81	2.41	3.60
Número de verticilos	<0.0001	4.76	1.14	3.25	5.80
Numero de ramas	<0.0001	18.95	5.37	11.19	25.87
Diámetro de ramas (cm)	<0.0001	1.88	0.47	1.37	2.17
Ángulo de inserción de ramas (°)	<0.0001	57.09	11.68	42.50	71.55

Variación y control genético

El coeficiente de variación genética del crecimiento y variables de calidad del fuste fueron moderadas (12.14 a 18.84 %), excepto en rectitud de fuste que presentó variación genética menor (8.01 %) (Tab. 2). Esto sugiere que existe importante variación genética entre familias (Wang et al. 2018) para la mayoría de las características evaluadas, lo que indica que se podrá obtener ganancias genéticas por selección (Cornelius et al. 1994). El coeficiente de variación genética de características de crecimiento (CVg = 15.11 a 18.21 %) en este estudio fue superior

a la variación genética de *P. patula*, *P. greggii* var. *australis*, *P. taeda* (7.76 a 16.11 %) (Escobar-Sandoval et al. 2018, Reyes-Esteves et al. 2022, Gwaze et al. 1997); asimismo, valores más bajos se reportan en otros estudios de *P. patula* (CVg= 6.19 y 6.52 %) (Morales et al. 2013), *P. oocarpa* (2.7 a 6.3 %) (Fabián-Plenikova et al. 2020) y *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* (Mirb.) Franco (3.21 a 3.60 %) (Vargas-Hernandez et al. 2003).

Los CVg (7.79 a 16.7 %) (Tab. 2) de las características de calidad de fuste de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* fueron similares a los CVg (7.06 a 15.93 %) de las mismas características de *P. patula* y *P. greggii* var. *australis* (Escobar-Sandoval et al. 2018, Reyes-Esteves et al. 2022), excepto para ángulo de ramas de *P. greggii* var. *australis* (CVg 3.86 y 6.69 %) y número de ramas de *P. patula* (2.97 %) (Escobar-Sandoval et al. 2018, Reyes-Esteves et al. 2022). Menor variación genética se reportó para número, diámetro y ángulo de inserción de ramas (CVg= 3.09 a 4.09 %) de *P. menziesii* var. *menziesii* (Vargas-Hernandez et al. 2003) y para número de verticilos (CVg= 4.27 y 7.80 %) de *P. patula* (Morales et al. 2013). El CVg (8.01) de la rectitud del fuste de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* fue mayor al de híbridos de *P. strobus* x *P. wallichiana* (CVg= 2.1 %) (Blada et al. 2013), pero menores a los CVg (25.2 %) de esta característica en *P. radiata* evaluado a 26 años (Gapare et al. 2012). La diferencia en variación genética del presente estudio con otros se puede deber a las diferencias en la edad de evaluación. En *P. taeda* el CVg de características de crecimiento disminuyó con la edad de plantación, de 14 % (1.5 años) a 2.94 % (22.5 años); mientras que, el CVg de la rectitud del fuste aumentó de 1.51 a 5.74 % (Gwaze et al. 1997).

Las heredabilidades individuales (h^2_i) y de medias de familias (h^2_f) de las características de crecimiento (Tab. 2) se clasificaron como altas (Cornelius 1994, Escobar-Sandoval et al. 2018, Reyes-Esteves et al. 2022); lo que indicó alto control genético en estas características. Entre las características de crecimiento, el diámetro de copa presentó mayores h^2_i y de h^2_f , mientras que, el incremento periódico en altura los menores valores (Tab. 2). Los valores altos de heredabilidad para las características de crecimiento determinados en este estudio eran de

esperarse porque *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* reporta altos valores para el crecimiento temprano de diámetro ($h^2_i = 0.26$ a 0.55 , $h^2_f = 0.87$ a 0.93) y altura ($h^2_i = 0.40$ a 0.95 , $h^2_f = 0.60$ a 0.98) (Sánchez et al. 2014, Cambrón-Sandoval et al. 2014). Asimismo, los valores de h^2_i y h^2_f determinados fueron superiores a los determinados para altura y diámetro ($h^2_i = 0.07$ a 0.11 , $h^2_f = 0.21$ a 0.30) de *P. greggii* var. *australis* en la Mixteca Oaxaqueña (Reyes-Esteves et al. 2022). Para otras especies del género *Pinus* se reporta amplio intervalo de heredabilidades en diámetro ($h^2_i = 0.00$ a 0.30 , $h^2_f = 0.07$ a 0.72) y altura ($h^2_i = 0.0014$ a 0.73 , $h^2_f = 0.12$ a 0.84) (Gwaze et al. 1997, Gwaze et al. 2001, Arregui & Merlo 2008, Fries 2012, Salaya-Dominguez et al. 2012, Morales et al. 2013, Bustillos-Aguirre et al. 2018, Escobar-Sandoval et al. 2018, Fabián-Plesnikova et al. 2020, Lauer et al. 2020, Lee et al. 2021, Reyes-Esteves et al. 2022), intervalo que incluye los valores obtenidos en el presente estudio.

Tab. 5. Coeficiente de variación genética y heredabilidades de progenies de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* evaluados en la Mixteca de Oaxaca.

Carácter	CVg (%)	h^2_i	EEh^2_i	h^2_f
Incremento periódico de diámetro basal (cm)	15.11	0.47	0.15	0.57
Incremento periódico en altura (m)	18.21	0.42	0.15	0.55
Diámetro de copa (m)	18.84	0.66	0.13	0.63
Rectitud de fuste	8.01	0.10	0.06	0.29
Número de verticilos	13.29	0.31	0.13	0.51
Número de ramas	16.70	0.38	0.14	0.55
Diámetro de ramas (cm)	12.33	0.28	0.12	0.47
Ángulo de inserción de ramas (°)	12.14	0.36	0.14	0.51

CVg (%) = Coeficiente de variación genotípica, h^2_i = heredabilidad individual, $EE(h^2_i)$ = Error Estándar, h^2_f = heredabilidad de medias de familias.

Las características de calidad del fuste tuvieron h^2_i y de h^2_f (Tab. 2) clasificadas como moderadas y altas (Cornelius 1994, Escobar-Sandoval et al. 2018, Reyes-Esteves et al. 2022), respectivamente. Excepto la rectitud de fuste, que presentó h^2_i baja y h^2_f moderada (Tab. 2). Lo anterior indicó que las características de calidad de fuste de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* presentan fuerte control genético; mientras que, la variación de la rectitud del fuste tiene menos control genético.

Información sobre el control genético de características que influyen en la calidad de madera no existen para ambas variedades de *P. pseudostrobus*. En la región Mixteca de Oaxaca, donde se realizó el presente estudio, Reyes-Esteves et al. (2022) evaluaron el control genético de estas características en progenies de *P. greggii* var. *australis* en dos sitios, la heredabilidad de la rectitud de fuste fue ligeramente mayor ($h^2_i = 0.11$ y 0.14 , $h^2_F = 0.31$ y 0.34) a lo obtenido para esta característica en este estudio; mientras que, los valores de heredabilidad del número de verticilos ($h^2_i = 0.15$ y 0.18 , $h^2_F = 0.37$ y 0.39), diámetro de ramas ($h^2_i = 0.06$ y 0.09 , $h^2_F = 0.21$ y 0.26) y ángulo de inserción de ramas ($h^2_i = 0.14$ y 0.07 , $h^2_F = 0.35$ y 0.21) de *P. greggii* var. *australis* fueron menores a lo obtenido para *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*. La heredabilidad individual ($h^2_i = 0.05$ a 0.15) y de medias de familias ($h^2_F = 0.32$ a 0.61) de la rectitud de fuste en *P. pinaster* (Arregui & Merlo, 2008) fue similar y mayor, respectivamente, al de este estudio; sin embargo, para *P. taeda* se reportó mayor variación de valores de heredabilidad individual ($h^2_i = 0.01$ a 0.83) de la rectitud de fuste y se demostró que estos incrementan con la edad de los ensayos (Gwaze et al. 1997, Gwaze et al. 2001). En general, en otras especies de pinos, menores valores de heredabilidad se reportaron para número de verticilos ($h^2_i = 0.09$ a 0.18 , $h^2_F = 0.206$ a 0.36), número de ramas ($h^2_i = 0.00$ a 0.17 , $h^2_F = 0.00$ a 0.47), diámetro de ramas ($h^2_i = 0.04$ a 0.08 , $h^2_F = 0.10$ y 0.42), ángulo de inserción de ramas ($h^2_i = 0.07$ a 0.35 , $h^2_F = 0.26$ a 0.47) (Gwaze et al. 1997, Gwaze et al. 2001, Arregui & Merlo 2008, Morales et al. 2013, Bustillos-Aguirre et al. 2018, Escobar-Sandoval et al. 2018); excepto *P. pinaster* que presentó mayor control genético ($h^2_F = 0.52$ a 0.79) para el ángulo de inserción de ramas (Arregui & Merlo 2008).

Los mayores valores de heredabilidad obtenidos en el presente estudio en comparación con los de otras especies de *Pinus* indican la baja influencia ambiental (Escobar-Sandoval et al. 2018) sobre *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, debido a la poca variación ambiental en el sitio de plantación. La variación de ambientes provoca cambios de los valores de heredabilidad, debido a familias interactivas (Gwaze et al. 2001, Morales et al. 2013, Reyes-Esteves et al. 2022). Sin embargo, las diferencias de los valores de heredabilidad obtenidos en comparación con la de

otras especies de *Pinus* posiblemente se debe a la edad de evaluación. El control genético del crecimiento y calidad de madera de algunas especies de pinos aumenta con la edad de evaluación (Gwaze et al. 1997, Gwaze et al. 2001, Arregui & Merlo 2008, Salaya-Dominguez et al. 2012, Morales et al. 2013, Bustillos-Aguirre et al. 2018, Fabián-Plesnikova et al. 2020).

Correlaciones genéticas y fenotípicas

Las correlaciones genéticas entre las características evaluadas fueron en su mayoría positivas y variaron de débiles a altas (0.160 a 0.881); sin embargo, el diámetro de ramas presentó correlación negativa con todas las variables de calidad de fuste y con el incremento periódico de diámetro basal (-0.498 a -0.198), asimismo, la rectitud de fuste tuvo correlación genética negativa con el diámetro de copa (Tab. 3). Por el contrario, todas las correlaciones fenotípicas fueron positivas; en su mayoría fueron significativas ($p \leq 0.009$), excepto algunas como la correlación entre el diámetro de copa con rectitud de fuste y número de verticilos, así como la correlación entre diámetro de ramas con rectitud de fuste, número de verticilos, número de ramas y ángulo de inserción de ramas ($p \geq 0.054$) (Tab. 3).

Tab. 6. Correlaciones genéticas con error estándar (arriba de la diagonal) y correlaciones fenotípicas con significancia (debajo de la diagonal) entre características de crecimiento y calidad de fuste de un ensayo de progenies de *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* en la Mixteca de Oaxaca.

	IPA	IPDB	DC	RFus	NVer	NRam	DRam	ARam
IPA		0.857 (0.053)	0.738 (0.065)	0.514 (0.555)	0.524 (0.249)	0.820 (0.082)	0.516 (0.276)	0.390 (0.288)
IPDB	0.838 (<0.0001)		0.881 (0.026)	0.665 (0.731)	0.337 (0.312)	0.553 (0.182)	-0.498 (0.769)	-0.245 (0.528)
DC	0.733 (<0.0001)	0.848 (<0.0001)		-0.026 (0.702)	0.201 (0.251)	0.376 (0.169)	0.561 (0.150)	0.160 (0.237)
RFus	0.519 (<0.0001)	0.364 (0.003)	0.117 (0.359)		0.899 (0.147)	0.873 (0.159)	-0.384 (2.183)	0.335 (0.868)
NVer	0.460 (0.0001)	0.373 (0.002)	0.242 (0.054)	0.585 (<0.0001)		0.873 (0.073)	-0.198 (0.867)	0.468 (0.318)
NRam	0.617 (<0.0001)	0.542 (<0.0001)	0.403 (0.001)	0.591 (<0.0001)	0.814 (<0.0001)		-0.410 (0.882)	0.461 (0.279)
DRam	0.468 (<0.0001)	0.658 (<0.0001)	0.666 (<0.0001)	0.028 (0.829)	0.072 (0.570)	0.100 (0.432)		-0.112 (0.725)

ARam	0.452 (0.0002)	0.326 (0.009)	0.363 (0.003)	0.366 (0.003)	0.529 (<0.0001)	0.609 (<0.0001)	0.038 (0.763)
------	-------------------	------------------	------------------	------------------	--------------------	--------------------	------------------

IPDB: incremento periódico en diámetro basal, IPA: incremento periódico en altura, DC: diámetro de copa, RFus: rectitud de fuste, NVer: número de verticilos, NRam: número de ramas, DRam: diámetro de rama, ARam: ángulo de inserción de ramas.

Las correlaciones genéticas positivas y altas (≥ 0.738) entre características de crecimiento es común debido a la interrelación existente en la velocidad de crecimiento de los árboles (Escobar-Sandoval et al. 2018); sin embargo, también indicaron fuerte asociación genética debido posiblemente a la presencia de genes comunes que influyen en estas características y al efecto de ligamiento entre genes cercanos (Falconer 2017, Reyes-Esteves et al. 2022). En la región Mixteca Oaxaqueña, donde se realizó el presente estudio, las correlaciones genéticas entre variables de crecimiento de *P. greggii* var. *australis* fueron positivas y altas (≥ 0.77) (Reyes-Esteves et al. 2022). En general, en otras especies del género *Pinus*, las correlaciones genéticas también son altas (0.47 a 0.97) entre las características de crecimiento (Arregui & Merlo 2008, Salaya-Dominguez et al. 2012, Fries 2012, Morales et al. 2013, Bustillos-Aguirre et al. 2018, Escobar-Sandoval et al. 2018, Fabián-Plesnikova et al. 2020).

En este estudio, las correlaciones genéticas entre las variables de crecimiento con las características de calidad del fuste variaron de moderadas a altas (0.514 a 0.820), excepto entre el ángulo de inserción de ramas con todas las variables de crecimiento, así como, el diámetro de copa con rectitud de fuste, número de verticilos y número de ramas, donde las correlaciones genéticas fueron débiles (Tab. 3). La asociación genética moderada a alta entre el incremento periódico en altura y diámetro basal con la rectitud de fuste constituye una ventaja desde el punto de vista del mejoramiento genético, ya que es posible aumentar la productividad y al mismo tiempo tener respuesta favorable en la rectitud de fuste. Por el contrario, las correlaciones entre el crecimiento y el resto de las variables de calidad de fuste resultaron desfavorables para el mejoramiento genético porque implica que árboles más productivos tendrían más ramas, más gruesas y con menor ángulo de

inserción, además de más verticilos; lo que, para la madera aserrada, sería mala calidad por la mayor cantidad de nudos, gruesos y con menor ángulo (Jayawickrama et al. 1997). En la región Mixteca de Oaxaca, para *P. greggii* var. *australis* las correlaciones genéticas entre características de crecimiento fueron positivas y débiles (0.02 a 0.12) con el número de verticilos, débiles a moderadas (0.03 a 0.40) con el ángulo de inserción de ramas y débiles a altas (0.09 a 0.97) con diámetro de ramas, mientras que, con la rectitud del fuste fueron negativas y débiles (0.02 a 0.34) (Reyes-Esteves et al. 2022). Las correlaciones genéticas entre características de crecimiento con la rectitud del fuste en *P. greggii* var. *australis* (Reyes-Esteves et al. 2022) contrasta con lo obtenido para *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* en este estudio. En general, las correlaciones genéticas entre variables de crecimiento y las características de calidad de fuste de otras especies de pinos varían de positivas o negativas y de débiles a altas (-0.59 a 0.84) (Arregui & Merlo 2008, Morales et al. 2013, Bustillos-Aguirre et al. 2018, Escobar-Sandoval et al. 2018). Además, esta asociación genética varía en la misma especie, por ejemplo, para *P. patula* se reportó asociación genética negativa de débil a moderada (-0.28 a -0.49) entre variables de crecimiento y el número de verticilos en algunos ensayos (Bustillos-Aguirre et al. 2018, Escobar-Sandoval et al. 2018); mientras que, en otro estudio se reportó asociación positiva de débil a alta entre estas características (0.23 a 0.89) (Morales et al. 2013). Incluso, el sitio pudo influir en esa asociación, como se reportó en *P. greggii* var. *australis* donde la correlación genética entre el diámetro de tallo y la rectitud de fuste fue positiva en un sitio, pero negativa en otro (Reyes-Esteves et al. 2022).

Las correlaciones genéticas entre las características de calidad del fuste, en su mayoría fueron positivas, de débiles a altas (0.335 a 0.899); excepto la correlación entre el número de ramas con el resto de estas variables, donde la correlación fue negativa (-0.112 a -0.384). Todas las correlaciones genéticas entre las variables de calidad de fuste son inadecuadas desde el punto de vista del mejoramiento, ya que a medida que se seleccione para mejorar en función de cierta característica, la calidad del fuste disminuye considerando cualquiera de las variables. La única correlación adecuada es la que existe entre la rectitud de fuste con el ángulo de

ramas, ya que a medida que se seleccione árboles más rectos, el ángulo de inserción de ramas será mayor, lo que indicaría mejor calidad de fuste (Magnussen & Yeatman 1987). En la región Mixteca de Oaxaca, las correlaciones genéticas entre las variables de calidad del fuste de *P. greggii* var. *australis* fueron negativas y positivas (-0.67 a 0.69) (Reyes-Esteves et al. 2022); intervalo que coincide con otras especies del género *Pinus* (Arregui & Merlo 2008, Bustillos-Aguirre et al. 2018, Escobar-Sandoval et al. 2018). Sin embargo, la correlación genética entre el mismo par de variables varía entre sitios, por ejemplo, Reyes-Esteves et al. (2022) encontraron que la correlación genética entre el ángulo de inserción de ramas con número de verticilos y con diámetro de ramas cambió de positivo a negativo de un sitio a otro, lo que sugiere influencia ambiental en la respuesta de las correlaciones genética, posiblemente por la existencia de interacción genotipo ambiente (Viveros-Viveros et al. 2006, Valencia et al. 2006, Wang et al. 2018), lo que también sugiere evaluar las familias de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* en otros sitios de la Mixteca de Oaxaca.

Conclusiones

El crecimiento y las características relacionadas a la calidad es diferencial entre familias de polinización libre de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* debido a diferencias genotípicas. En general, las características de crecimiento y de calidad de fuste presentan variación genética moderada y control genético alto; por lo cual es posible usar a estas características como criterios de selección y obtener ganancias genéticas por selección de mejores genotipos. La asociación genética entre variables de crecimiento es favorable para el mejoramiento genético de esta variedad de pino; en cambio, las relaciones genéticas entre las variables de crecimiento con las variables de calidad de fuste resultaron desfavorables, debido a que la selección de genotipos de mayor crecimiento ocasionaría una respuesta correlacionada negativa en la calidad de fuste, que implicarían árboles con mayor número de verticilos, con más ramas, ramas más gruesas y con menor ángulo de inserción. Solamente la rectitud de fuste con el crecimiento presenta relación

genética favorable, por lo que la seleccionar genotipos con mayor crecimiento se tendrían árboles más rectos.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto nacional de investigación: “Establecimiento de huertos semilleros asexuales regionales y ensayos de progenie de *Pinus pseudostrobus* para la evaluación genética de los progenitores”. Financiado por el fondo sectorial CONAFOR-CONACYT, con el número de proyecto: 277784.

Bibliografía

- Aitken SN (2004). Genetics and genetic resources. Genecology and Adaptation of Forest Trees. In: Burley J, ed. Encyclopedia of Forest Sciences. Elsevier 197-204. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-145160-7/00086-7>
- Arregui RZ, Merlo E (2008). El programa de mejora genética de *Pinus pinaster* en Galicia. Boletín del CIDEU, 6-7: 5–24. [Online] URL: <http://hdl.handle.net/10261/45946>
- Barszcz A, Sandalak A, Sandalak J (2010). Knottiness of spruce stems from the Dolomites as the basis for distinguishing quality zones in round wood. Folia Forestalia Polonica, series A 52(2): 89-97
- Blada I, Tanasie Ş (2013). Growth, straightness and survival at age 32 in a *Pinus strobus* x *P. wallichiana* F1 hybrid population (Experiment 2). Annals of Forest Research 56(1): 15-30. DOI: <https://doi.org/10.15287/afr.2013.27>
- Budeanu M, Şofletea N, Pârnuță G (2012). Qualitative Traits of Norway Spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] Depending on First-Order Branches: Evaluation in Comparative Trials. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 40(2): 295-301. DOI: <https://doi.org/10.15835/nbha4028148>
- Bustillos-Aguirre CV, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J, Ramírez-Valverde G (2018). Repetibilidad de parámetros genéticos de las características de ramificación en progenies de *Pinus patula*. Madera y Bosques 24(1) e2411131. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.241113>.
- Cambrón-Sandoval VH, Suzán-Azpíri H, Sáenz-Romero C, Sánchez-Vargas N (2014). Desarrollo de *Pinus pseudostrobus* bajo distintos ambientes de

- crecimiento en jardín común. *Madera y Bosques* 20(1):47–57. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201175>.
- Cornelius J (1994). Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest trees. *Canadian Journal of Forest Research* 24(1): 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1139/x94-050>
- Courbet F, Jean-Cristophe H, Klein EK, Colin F (2012). Diameter and death of whorl and interwhorl branches in Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti): A model accounting for acrotony. *Annals of Forest Science* 69(2):125–138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0156-1>.
- Escobar-Sandoval MC, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J, Espinosa-Zaragoza S, Borja-de la Rosa A (2018). Genetic parameters for wood quality, growth and branching traits in *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, 24(2):1–11. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595>.
- Fabián- Plesníková I, Sáenz-Romero C, de León JC, Martínez-Trujillo M, Sánchez-Vargas NM (2020). Growth trait genetic Parameters in a progeny trial of *Pinus oocarpa*. *Madera y Bosques* 26(3):1–14. DOI <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632014>.
- Falconer DS (2017). Introduction to quantitative genetics. Forgotten Books: San Francisco, CA, USA.
- Falconer DS, MacKay TFC (1996) Introduction to quantitative genetics. Longman Group Ltd, London, p 464p.
- Fries A (2012). Genetic parameters, genetic gain and correlated responses in growth, fibre dimensions and wood density in a Scots *Pine* breeding population. *Annals of Forest Science* 69(7): 783–794. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0202-7>.
- Gapare WJ, Ivković M, Dillon SK, Chen F, Evans R, Wu X (2012). Genetic parameters and provenance variation of *Pinus radiata* D. Don. 'Eldridge collection' in Australia 2: wood properties. *Tree Genetics & Genomes* 8: 895–910. DOI: 10.1007/s11295-012-0475-x

- Gwaze DP, Wolliams JA, Kanowski PJ, Bridgwater FE (2001). Interactions of genotype with site for height and stem straightness in *Pinus taeda* in Zimbabwe. *Silvae Genetica* 50(3–4): 135–140.
- Gwaze DP, Woolliams JA, Kanowski PJ (1997). Genetic parameters for height and stem straightness in *Pinus taeda* Linnaeus in Zimbabwe. *Forest Genetic* 4(3): 159-169.
- Hurel A, de Miguel M, Dutech C, Desprez ML, Plomion C, Rodríguez I, Cyrille A, Guzman T, Alía R, González SC, Budde KB (2021). Genetic basis of growth, spring phenology, and susceptibility to biotic stressors in maritime pine. *Evolutionary Application* 14(12), 2750–2772. DOI: <https://doi.org/10.1111/eva.13309>.
- Ipinza R (2018). Migración asistida: el nuevo paradigma de la conservación de recursos genéticos forestales para la adaptación al cambio climático. *Ciencia & Investigación Forestal* 24(3): 69–88. DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2018.504>
- Jayawickrama KJS, Shelbourne CJA, Carson MJ (1997). New Zealand's long internode breed of *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 27(2): 126-141
- Kapeller S, Schuler S, Huber G, Boi G, Wohlgemuth T, Klumpp R (2013). Provenance Trials in Alpine Range – Review and Perspectives for Applications in Climate Change. *Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks*. DOI:10.5772/56283
- Lauer E, Sims A, McKeand S, Isik F (2020). Genetic Parameters and Genotype-by-Environment Interactions in Regional Progeny Tests of *Pinus taeda* L. in the Southern USA. *Forest Science* 67(1): 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa035>.
- Lee K, Kim IS, Lee SW (2021). Estimation of genetic parameters on growth characteristics of a 35-year-old *Pinus koraiensis* progeny trial in South Korea. *Journal of Forestry Research* 32(5): 2227–2236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01257-w>.

- López M, Sánchez RB, Contreras JR, Armenta D, Félix JA (2017). Captación de carbono en suelos asociados a *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus oaxacana* Mirov. en la Mixteca Alta, Oaxaca. *Ecología Aplicada* 16(2): 127-133. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v16i2.1016>
- Machuca-Velasco R, Borja-de la Rosa A, Morales-Villalba E, Flores R (2012). Trabajabilidad de la madera de *Pinus oaxacana* Mirov. proveniente de una plantación en el estado de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 18(2):193–205. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.001>.
- Magnussen S, Yeatman CW (1987). Early testing of jack pine. II. Variance and repeatability of stem and branch characters. *Canadian Journal of Forest Research* 17(6): 460-465. DOI: [org/10.1139/x87-079](https://doi.org/10.1139/x87-079)
- Martínez J, Licona AL, González MV, Becerra A, Pérez EA, Patlán E (2015). Diagnóstico de la degradación de la tierra en la microcuenca del Yute Ndaa, Ñuu Ndeku, Ñuu Savi, Oaxaca. *Revista de Geografía Agrícola* 55: 7-25. [Online] URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75749286002>
- Martínez J, Altieri M, Anta S, Caballero JJ, Hernández JJ (2006). Manejo del agua y restauración productiva de región indígena Mixteca de Puebla y Oaxaca. The International Bank for Reconstruction and Development, Washington DC, USA, pp. 103. [Online] URL: http://centro.paot.org.mx/documentos/bm/man_agua_res_pro.pdf
- Meyer K (2007). WOMBAT –A program for mixed models analyses in quantitative genetics by REML. *Journal of Zhejiang University Science B* 8(11): 815-821. [Online] URL: www.zju.edu.cn/jzus; www.springerlink.com
- Morales E, López J, Varga JJ, Ramírez C, Gil A (2013). Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnía Mexicana*, 36(2), 155–162.
- Ortiz MR (2015). Análisis del crecimiento de *Pinus oaxacana* y *Pinus greggii* en ambientes degradados de la Mixteca Oaxaqueña. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. 77 p.

- Ortiz R, Aguirre OA, Gómez M, Treviño EJ, González MA (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. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.710>
- Plancarte A 2015. Reforestación con especies nativas en la mixteca oaxaqueña. Proyecto Mixteca Sustentable A. C. p 80.
- Ramírez A, Navarro H, Pérez A, Cetina VM (2011). Experiencia organizativa para la reforestación con *Pinus oaxacana* Mirov. en suelos degradados de la mixteca oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(7): 57-70. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.560>
- Reyes-Esteves GI, López-Upton J, Velasco-García MV, Jiménez-Casas M (2022). Genetic parameters of a progeny trial of *Pinus greggii* Engelmann ex Parlatores var. *australis* Donahue & López in the Mixteca Alta of Oaxaca, Mexico. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente* 28(1): 75–88. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.10.067>.
- Ruano A, Alberdi I, Adame P, Moreno D, Amiano AC, Fernández J, Hermoso E, Hernández L, Merlo E, Sandoval V, Cañellas I (2023). Improving stem quality assessment based on national forest inventory data: an approach applied to Spanish forests. *Annals of Forest Science* 80(1). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01187-7>.
- Salaya-Dominguez JM, López-Upton J, Vargas-Hernandez JJ (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia* 46: 519-534.
- Sánchez NM, Cambrón VH, Sáenz C, Vargas JJ (2014). Parámetros genéticos del crecimiento temprano de familias de medios hermanos de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en Michoacán, México. *Revista Forestal Venezolana* 58(1): 65-75.
- Santiago-Mejía BE, Martínez-Menez MR, Rubio-Granados E, Vaquera-Huerta H, Sánchez-Escudero J (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura sociedad y desarrollo* 15(2): 275-288. [Online] URL:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S187054722018000200275&lng=es&nrm=iso

- Valencia S, Velasco MV, Gómez M, Ruíz M, Capo MÁ (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.
- Vargas-Hernandez J, Adams WT, Joyce DG (2003). Quantitative genetic structure of stem form and branching traits in Douglas-fir seedlings and implications for early selection. *Silvae Genetica* 52: 36-44. [Online] URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:89026685>
- Vázquez-García I, Cetina-Alcalá VM, Campos-Bolaños R, Casal-Ángeles LF (2016). Evaluación de plantaciones forestales en tres comunidades de la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Agroproductividad* 9(2): 12-19.
- Velasco-Velasco VA, Enríquez-del Valle JR, Rodríguez-Ortiz G, Campos-Ángeles GV, Gómez-Cárdenas M, García-García ML (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. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i9.534>
- Villegas-Jiménez DE, Rodríguez-Ortiz G, Velasco-Velasco A, Ruiz-Luna J, Carrillo-Rodríguez JC, Ramírez-Sánchez SE (2013). Partición de biomasa aérea en procedencias de *Pinus greggii* plantadas en el sur de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(4): 421-427. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.4.421>
- Viveros-Viveros H, Sáenz-Romero C, López-Upton J, Vargas-Hernández JJ (2005). Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en campo. *Agrociencia* 39(5): 575-587.
- Viveros-Viveros H, Sáenz-Romero C, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29 (2): 121 – 126. [Online] URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61029204>
- Wang JJ, Weng YH, Krasowski M, Yan GH, Fullarton M (2018). Genetic parameters of growth and stem forking for black spruce progeny tested in New Brunswick,

Canada. *New Forests* 49(2): 265–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9618-0>.

White TL, Adams WT, Neale DB (2007) *Forest Genetics*. CABI Publishing. Cambridge, MA, USA. P 682.

White TL, Hodge GR (1989). Predicting breeding values with applications in forest tree improvement. Kluwer Academic Publisher: Dordrecht, Países Bajos 367 p.

Zobel BJ, Talbert JT (1988). Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. México D.F., México. Ed. Limusa. P 545.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIÓN GENERAL

Las diferencias de propiedades del suelo y condiciones climáticas de los sitios de ensayo influyen sobre la supervivencia, el crecimiento de diámetro basal, altura y diámetro de copa, así como sobre características de calidad del fuste como rectitud de fuste, bifurcación, número de verticilos, número, grosor y ángulo de inserción de ramas. En general, los mejores valores de propiedades químicas y físicas del suelo en Yosondúa ocasionaron mejores crecimientos en comparación a Monte Flor, donde las condiciones químicas y físicas del suelo, asociado a ser la baja humedad ocasionaron menores crecimientos. Por otra parte, el daño de hormigas del género *Atta* sp. en el sitio Monte Flor también influyó en la menor supervivencia y crecimiento en este sitio.

Las diferencias genéticas entre procedencias ocasionan diferencias en supervivencia, crecimiento y calidad del fuste de dentro de cada sitio. En términos de crecimiento (diámetro basal, altura y diámetro de copa), Yoloxt e Ixtepeji son las procedencias de mayor crecimiento, por lo que, el germoplasma de éstas se debe usar para establecer reforestaciones en condiciones de suelo y climáticas similares a las de los sitios probados. Las procedencias de mayor crecimiento, en general presentaron tallos mayor diámetro de ramas, número de verticilos y menor ángulo de inserción de ramas, lo que representaría mala calidad de madera; sin embargo, esto podría estar influenciado por el mayor crecimiento, puesto que a mayor crecimiento en diámetro, mayor diámetro de ramas y a mayor crecimiento en altura, mayor número de verticilos, en comparación con árboles de menor crecimiento; pero se requieren evaluaciones a mayor edad para mayor contundencia de estos resultados. Por otra parte, es evidente que el movimiento de longitudinal amplio de semillas (más de 250 km lineales de norte a sur), no beneficia al crecimiento; mientras que, el movimiento latitudinal amplio (de este a oeste) también parece también tener efecto negativo sobre el crecimiento. Por lo anterior las procedencias Xico del estado de Veracruz, así como Albarrada y Gutiérrez del estado de Chiapas no se deben usar en las condiciones probadas. El diámetro de copa, número de verticilos y número de ramas presentaron interacción genotipo x ambiente, por lo

que, si el objetivo es la restauración de suelos se debe cuidar de no usar la misma semilla para todos los sitios.

En cuanto a los parámetros genéticos, el crecimiento y características de calidad de fuste presentaron variación genética moderada, pero alto control genético. Los valores de heredabilidad individual y de medias de familias fueron altos, lo cual es benéfico en el proceso de mejoramiento genético, debido a que es posible usar características como criterios de selección y obtener ganancias significativas por selección. La correlación genética alta entre variables de crecimiento permite usar cualquiera de estos como criterio de selección para obtener ganancias genéticas en este conjunto de variables. Por el contrario, las relaciones genéticas entre las variables de crecimiento con características de calidad del fuste son desfavorables desde el punto de vista del mejoramiento genético. Solamente la correlación entre el crecimiento y la rectitud de fuste es favorable para el mejoramiento genético.

Los resultados del estudio de procedencias de esta investigación deben ser usados para planear las reforestaciones con *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* en la región Mixteca Oaxaqueña; sin embargo, se recomienda que dentro de las procedencias de mejor desempeño se elija germoplasma de las mejores familias para obtener mayores ganancias genéticas.