



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**



**Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas
Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales IIAF**

**Variación genética altitudinal entre procedencias de *Pinus patula*
Schltdl. & Cham. en ensayos de vivero y campo en Ixtlán de
Juárez, Oaxaca.**

Tesis que presenta:

LORENA FABIOLA RUIZ TALONIA

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

DIRECTOR DE TESIS: DR. CUAUHTÉMOC SAENZ ROMERO

CODIRECTOR: DR. NAHUM SÁNCHEZ VARGAS

Morelia, Michoacán, Mayo 2010.

CONTENIDO

Resumen general.....	iv
Summary.....	v
1.1 - Introducción general.	1
1.2- Descripción de la especie.....	4
1.2.1- Descripción botánica.....	4
1.2.2- Ecología y distribución en México.....	5
1.2.3- Importancia económica.....	6
1.2.4- Ensayos de procedencias.....	7
1.3- Descripción del área de estudio.....	8
1.4 – Hipótesis.....	11
1.5-Literatura citada.....	12
2- VARIACIÓN GENÉTICA ENTRE PROCEDENCIAS DE <i>Pinus patula</i> EN ENSAYO DE VIVERO.	
Resumen.....	14
Abstract.....	15
2.1- Introducción.....	16
2.2- Objetivos.....	18
2.3- Materiales y métodos	19
2.3.1- Establecimiento del ensayo.....	19
2.3.2- Análisis de datos	21

2.4- Resultados y discusión.	22
2.5- Conclusiones.....	28
2.6-Literatura citada.....	29
3- VARIACIÓN GENÉTICA ALTITUDINAL EN EL CRECIMIENTO DE PROCEDENCIAS DE <i>Pinus patula</i> EN CAMPO.	
Resumen.....	31
Abstract.....	32
3.1 Introducción	33
3.2 Objetivos.....	38
3.3- Materiales y métodos.	39
3.3.1- Establecimiento del ensayo en campo.....	39
3.3.2- Análisis de datos.....	40
3.3.2.1- Análisis conjunto de ambos sitios.....	40
3.3.2.2- Análisis por sitio	41
3.3.2.3- Zonificación altitudinal.....	42
3.3.2.4- Estimaciones de clima contemporáneo y futuro.....	44
3.4- Resultados y discusión.....	45
3.4.1- Análisis conjunto	45
3.4.2- Interacción genotipo x ambiente.....	48
3.4.3- Análisis por sitio	53
3.4.4 Correlación entre edades.....	56

3.4.5- Zonificación altitudinal.....	57
3.4.6- Alternativas de manejo. Usos de la zonificación altitudinal.....	59
3.4.6.1 Restauración ecológica.....	59
3.4.6.2 Conservación de recursos genéticos.....	60
3.4.6.3 Mejoramiento genético.....	60
3.4.6.4 Adaptación a los efectos del cambio climático.....	61
3.5- Conclusiones.....	63
3.6-Literatura citada.....	65
4- Discusión general.....	70

RESUMEN GENERAL

Con el propósito de determinar un posible patrón de variación genética altitudinal entre procedencias de *Pinus patula*, se colectaron semillas de 13 poblaciones de esta especie en bosques de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, a lo largo de un transecto altitudinal entre 2400 y 3000 m de altitud, en sitios separados por 50 m de altitud. Las semillas se sembraron en un ensayo de procedencias en un vivero de la comunidad. Las plantas obtenidas de vivero a los 9 meses de edad a partir de la fecha de siembra, se plantaron en dos sitios de la comunidad, a dos altitudes contrastantes: 2,500 y 3,000 m. Las variables a evaluar fueron: altura a los 3, 6 y 9 meses de edad en vivero y 9, 12, 18 y 24 meses en campo y diámetro a los 6 y 9 meses de edad en vivero y 18 y 24 meses en campo e índice de elongación de yema a los 16 meses. Se encontraron diferencias significativas entre procedencias para la variable altura desde los 3 meses de edad en vivero, hasta los 24 meses en campo, cuando los análisis se realizaron para cada sitio. Se encontró interacción genotipo x ambiente moderada ($r_B = 0.36$). Se observó un patrón altitudinal estadísticamente significativo para altura a los 3, 18 y 24 meses, donde las poblaciones de altitud de origen intermedias crecieron más que las de los extremos, con base a estos resultados, se propuso una zonificación para el manejo de semilla y planta en la que se delimitaron tres zonas, con límites a los 2,400, 2,600, 2,800 y 3,000 m de altitud, que pueden servir como guía útil para la toma de decisiones respecto a la transferencia de semillas en planes de restauración ecológica, conservación de recursos genéticos, mejoramiento genético y adaptación a los efectos del cambio climático. Se encontró significancia entre las correlaciones de los estudios de vivero y campo entre las edades de 6 y 24 meses, así como entre los 12 y 24 meses. La procedencia originaria de 2,650 m de altitud tiene crecimiento superior a las demás en ambas etapas, podría seleccionarse preliminarmente como la mejor fuente de semilla, para plantaciones comerciales con esta especie en la región de Ixtlán de Juárez.

Palabras clave: *Pinus patula*; procedencias; variación genética altitudinal; vivero; Ixtlán de Juárez; Oaxaca; zonificación de semillas.

SUMMARY

In order to determine a possible altitudinal pattern of genetic variation among provenances of *Pinus patula*, seeds were collected from 13 populations of this species in the community forest of Ixtlán de Juárez, Oaxaca, along an altitudinal transect between 2400 and 3000 m, at sites separated by 50 m of altitude. The seeds were sowed in a provenance test at a nursery in the community. Nursery plants raised at 9 months from the sowing date were planted in two sites in Ixtlán de Juárez at two contrasting altitudes: 2,500 and 3,000 m. Measured variables were: height at 3, 6 and 9 months of age in nursery and 9, 12, 18 and 24 months in field; diameter at 6 and 9 months of age in nursery and 18 and 24 months in field, as well as bud elongation rate at 16 months. There were significant differences among provenances for height since the age of 3 months in the nursery until 24 months in the field, when the analysis was conducted by each site. There was moderate genotype x environment interaction ($r_B = 0.36$). There was a statistically significant altitudinal pattern for height at 3, 18 and 24 months, where populations of intermediate altitude of origin grew faster than the originated at the extremes. Based on these results, it was proposed a zoning for seed and plant management, in which three zones were defined, with altitudinal limits at 2400, 2600, 2800 and 3000 m. This zoning can serve as a useful guide for making decisions regarding the transfer of seeds into plans for ecological restoration, conservation of genetic resources, genetic improvement and adaptation to climate change impacts. Significance was found in the correlations of the nursery and field tests between ages, between 6 and 24 months and between 12 and 24 months. The provenance originated at 2,650 m from altitude had better growth than the others in all the evaluations in nursery and field tests, and could be selected preliminarily as the best source of seed for commercial plantations with this species at Ixtlán de Juárez.

Key words: *Pinus patula*; provenances; altitudinal genetic variation; nursery; Ixtlán de Juárez; Oaxaca; seed zoning.

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La cobertura forestal en México supera los 55 millones de hectáreas. La actividad de reforestación es relativamente reciente, de manera que la mayoría de las plantaciones apenas está alcanzando la edad de aprovechamiento. Para un país tan extenso, el área total de plantaciones es realmente escasa. Hasta el momento, la madera industrial proviene casi exclusivamente de los bosques naturales, no obstante las grandes ventajas que presenta el país para la actividad de plantaciones (Mesén, 2003). Se estima que existen 10.7 millones de hectáreas, con características de clima y suelo aptas para el establecimiento de plantaciones comerciales las cuales han sido subutilizadas. Además existe una superficie aún exigua de 34 mil hectáreas de plantaciones comerciales en México. Entre las principales especies con potencial de aprovechamiento se encuentran las del género *Pinus* (CONAFOR, 2001).

Del total de ejidos y comunidades en México, 8,928 poseen superficies cubiertas por bosques o selvas. De éstos, se estima que 3,056 ejidos que poseen superficie forestal tienen su principal fuente de ingresos en las actividades productivas relacionadas con estos recursos. De las comunidades y ejidos que poseen superficies de bosques y selvas, entre 5 y 9% opera una empresa forestal comunitaria desarrollada. Lo anterior se traduce en un número de entre 620 a 800 empresas forestales sociales, que presentan diferentes niveles de consolidación en términos del control de los procesos productivos (CONAFOR, 2008). En el país se calcula que existen 16 millones de hectáreas de terrenos forestales con posibilidades de reforestación y restauración. En estos terrenos es urgente realizar plantaciones de diferentes tipos; aunque es posible que en la mayoría de los casos sólo puedan hacerse con fines de reforestación y restauración ecológica, pero cuyo propósito secundario podría ser la producción de productos maderables. Los programas de producción de planta, reforestación y plantación han carecido de integración y optimización; el poco énfasis en el cuidado posterior de las reforestaciones, ha

llevado a una tasa alta de mortalidad y ha propiciado el uso ineficiente de los recursos presupuestales (CONAFOR, 2001).

El escaso conocimiento de las características, propiedades y uso de las especies de árboles en las diferentes regiones de México, que pueden tener alto potencial para el establecimiento de plantaciones forestales con diversos fines, plantea la necesidad de utilizar aquellas especies mejor conocidas, que por su manejo, su distribución altitudinal y condiciones climáticas en que se desarrollan, tienen mayores posibilidades de producir productos madereros (Mendizábal-Hernández *et al.*, 1999).

Algunas especies forestales muestran variación en caracteres cuantitativos como el crecimiento en altura y diámetro a lo largo de gradientes ambientales, esto como respuesta adaptativa a la selección del ambiente (Campbell and Sugano, 1993). Conocer la variación genética de los caracteres de importancia adaptativa es útil para establecer medidas que incrementen la productividad de las plantaciones, al mejorar el acoplamiento entre las condiciones ecológicas del sitio de plantación y las características genéticas de las plántulas. Esto facilita la toma de decisiones para acciones de conservación de especies forestales y restauración de los ecosistemas (Viveros-Viveros *et al.*, 2005).

El éxito conseguido en el establecimiento de plantaciones de árboles forestales, está determinado por la especie utilizada y la fuente de semilla dentro de la especie, para ello es necesario establecer un ensayo de procedencias, en el que se puede seleccionar la fuente más adecuada para un sitio determinado (Zobel y Talbert, 1992). Si existe un patrón de diferenciación genética altitudinal entre procedencias, es recomendable desarrollar lineamientos para decidir el movimiento de semillas y plantas a través de una zonificación altitudinal definida, a fin de garantizar la adaptación de las plantas a los sitios de reforestación (Sáenz-Romero, 2004).

Ixtlán de Juárez, Oaxaca, es una comunidad campesina, en donde la actividad económica más importante es la forestal, la cual emplea al 70% de la

población económicamente activa. Antes de la formación de la empresa forestal (iniciada en 1988), la comunidad tenía como actividades productivas la agricultura, la fruticultura, así como el desarrollo de ganadería familiar doméstica. Con la empresa forestal, la actividad agrícola y ganadera se redujo, practicándose en no más de 300 hectáreas. El remanente de tierras anteriormente agrícolas, está en proceso de regeneración natural de bosque programado para su reforestación. Su trabajo forestal comunitario la han hecho acreedora al premio nacional al mérito forestal sustentable 2000 (Consejo Forestal Mundial, 2001).

En el aprovechamiento de especies forestales de la región de Ixtlán predomina la utilización de *Pinus patula*. Ésta es una especie endémica subtropical con alto potencial productivo, debido a sus altas tasas de crecimiento, resistencia moderada a heladas, buena calidad de madera disponible para productos celulósicos o de madera sólida en pisos, duelas, construcción en general, acabados de interiores y exteriores, estructuras, armaduras, madera aserrada, madera terciada, chapa, postes para servicios públicos, durmientes, vigas, columnas, cajas y empaques (Meza-Juárez *et al.*, 2005; Dvorak *et al.*, 2000).

En el presente trabajo, se pretende contribuir al conocimiento de la variación genética altitudinal entre procedencias de *Pinus patula* de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, con el fin de generar información que permita seleccionar las fuentes apropiadas para la colecta y movimiento de semilla a lo largo de un gradiente altitudinal, así como hacer una selección temprana de las procedencias más productivas para plantaciones que se realicen con esta especie. En el segundo capítulo, se evalúa la variación genética entre 13 procedencias colectadas a lo largo de un gradiente altitudinal, en caracteres de crecimiento en un ensayo de vivero. En el tercer capítulo se evalúan caracteres de crecimiento y supervivencia de esas mismas procedencias en un ensayo de campo y se correlacionan con los resultados de vivero.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

1.2.1 Descripción botánica

Pinus patula Schlecht et Cham. 1828.

Es un árbol de 10 a 40 m de altura; de corteza gruesa, rugosa y escamosa de coloración café rojiza, con ramas colocadas irregularmente, comúnmente 2/3 o más de la longitud del árbol está libre de ramas, las ramillas son rojizas y escamosas, con ligero tinte blanquecino en sus partes más tiernas. Las hojas se encuentran reunidas en grupos de 3, 4 y raramente 5 en cada fascículo, miden de 15 a 30 cm de largo, son delgadas y colgantes, de color verde brillante con los bordes finamente aserrados y los dienteillos muy finos; tienen dos haces fibrovasculares aproximados y sus canales resiníferos son medios, ocasionalmente internos en número de uno a cuatro; persisten de 2 a 3 años. La vaina es persistente, fuerte, algo grisácea, de 10 a 15 mm; las yemas son amarillentas, largas y erguidas; los conillos son laterales, pedunculados, con las escamas extendidas y provistas de una punta fina y caediza. Los conos son largamente cónicos, de 7 hasta 12 cm, duros, sésiles, reflejados, algo encorvados, oblícuos y puntiagudos; por lo general en grupos desde dos a seis; su color es amarillo-ocre, con tinte rojizo lustroso; son tenazmente persistentes, serotinos, se abren parcialmente en diferentes épocas. Las escamas son duras, casi uniformes con el ápice redondeado, tienen umbo deprimido con una punta oscura muy pequeña y extendida; miden aproximadamente 30 mm de largo por 12 a 14 mm de ancho. La semilla es de ovoide a casi triangular, aguda, de color moreno grisáceo de 4-6 mm de largo por 2-4 de ancho; ala articulada de 8-12 mm de largo por 5-8 de ancho, de color café claro con estrías oscuras. La madera es suave, débil, de color claro ligeramente amarillento, con vetas moreno pálidas. Es fácil para trabajar y poco resinosa (Martínez, 1948; Farjon y Styles, 1997).

1.2.2 Ecología y distribución en México.

Pinus patula es una especie endémica de México, que presenta alta variabilidad fenotípica y genética en diversas características de interés económico (Meza *et al.*, 2005). De forma natural se extiende en sitios aislados a lo largo del este de la Sierra Madre Oriental en México, desde el estado de Tamaulipas hasta el estado de Oaxaca en México, entre 24° y 17°N de latitud. El centro de diversidad de la especie, se encuentra en el límite entre los estados de Hidalgo y Veracruz, en la Sierra de Huayacocotla. Crece mejor en suelos húmedos, profundos, con al menos 60 cm de profundidad y bien drenados, con precipitación anual entre 1000 y 1500 mm, en altitudes de 1,500 a 3,100 m. Forma masas puras o se asocia con *P. greggii* Engelm., *P. maximinoi* Moore., *P. pseudostrobus* Lindl., *P. teocote* Schl. et Cham., *P. leiophylla* Schl. et Cham y *P. patula* var. *longepedunculata* Loock (Perry, 1991). El rango de temperatura media de distribución para *P. patula* es de 10 a 18° C; tolera temperaturas menores a -9°C en invierno (Wormald, 1975).

Es una especie pionera agresiva que se regenera rápidamente en áreas en que han ocurrido incendios, una vez que la semilla cae en suelos con las condiciones optimas; puede sobrevivir a incendios de baja intensidad, tienen la capacidad de crecer en gran densidad en espacios reducidos, lo que les permite mantener un alto grado de humedad y prevenir la invasión por *Quercus* spp. En su ambiente natural, aparece comúnmente libre de enfermedades, pero es ligeramente susceptible a ciertas plagas en lugares donde es exótica (Dvorak *et al.*, 2000).

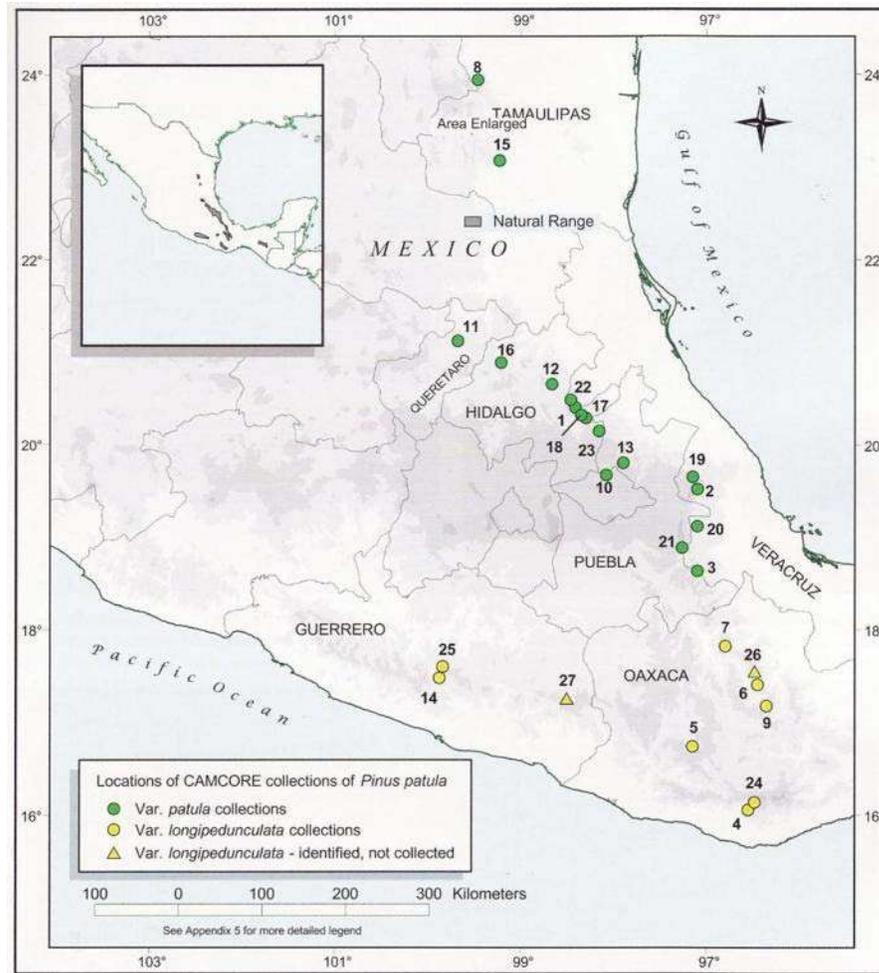


Figura 1. Distribución natural de poblaciones de *P. patula* (Tomado de Dvorak *et al.*, 2000).

1.2.3 Importancia económica

Esta especie tiene gran importancia económica por su rápido crecimiento, por lo que es apreciada en el establecimiento de plantaciones comerciales en las regiones templadas y subtropicales del mundo, tiene una de las mayores tasas de crecimiento de las especies de coníferas nativas de México. Además del crecimiento, presenta otras ventajas respecto a otras especies del género *Pinus* de México, entre las que se encuentra la resistencia moderada tanto a sequías como a heladas, la capacidad de formar híbridos con otras especies, la resistencia a algunas plagas

tanto en su hábitat natural como en aquellos lugares en donde ha sido introducida, así como información sobre algunas de las mejores procedencias. Actualmente existen fuentes de semilla mejorada disponibles (Dvorak, 2003).

Es la especie más ampliamente plantada de la Subsección Oocarpa, de las cuales han establecido numerosas plantaciones alrededor del mundo, la mayoría en el Sur y Este de África, en Tanzania, Malawi Kenia, Zimbabwe y Sud África, así como en Argentina, Colombia, Ecuador, Chile, Brasil y Perú (Dvorak *et al.*, 2000).

La madera de esta especie, es ampliamente utilizada para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales, con propósitos de producción de material celulósico y madera en rollo. Fue una de las primeras especies de pinos mexicanos en ser plantadas en Sudáfrica (Perry, 1991). Aproximadamente en 1907, comenzaron a establecerse plantaciones a gran escala; posteriormente su empleo se extendió en varios países de Africa, Nueva Zelanda y Australia, Asia y Sudamérica. Actualmente, se ha establecido como parte de plantaciones en más de veinte países de los trópicos y subtropicos desde los años 1900's (Luna-Rodríguez *et al.*, 2005; Meza *et al.*, 2005) La mayoría de las plantaciones realizadas en África entre 1907 y 1928, fueron con semilla de procedencia desconocida colectada en México (Wormald, 1975).

1.2.4 Ensayos de procedencias

En el presente trabajo el término población se refiere a un grupo de árboles que crece en un lugar determinado, o a su progenie; procedencia se utilizará para designar la localización geográfica de una población y ensayo de procedencias como el estudio en que se evalúa el crecimiento de diferentes poblaciones en un mismo sitio, bajo un diseño experimental.

En otros países del mundo, los ensayos de procedencias de *P. patula* se establecieron en la década de 1940, con semilla colectada en una amplia zona de distribución natural de la especie. Posteriormente, se realizaron colectas para

establecer ensayos en países de África y Sudamérica. Los programas de mejoramiento genético con la especie más avanzados, son los de Sudáfrica, en los cuales se han hecho evaluaciones con material introducido de procedencias inicialmente desconocidas, en donde se ha logrado mejorar características como velocidad de crecimiento, forma del fuste, tamaño y ángulo de las ramas, tamaño de la copa y densidad de la madera, entre otras (Wormald, 1975).

En México, en 1971, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), con apoyo de la FAO, coleccionó materiales para establecer ensayos en los países interesados (Dvorak, 2003).

Recientemente se han establecido algunos ensayos de procedencias y progenies por CAMCORE (Central America and Mexico Coniferous Resources Cooperative), en países de África y el sur de América, en donde la especie ha sido establecida como exótica. Los resultados en estos últimos, indican que las procedencias de la parte central del rango de distribución natural de la especie, en los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz, son generalmente más productivas que las procedencias ubicadas más hacia el norte o sur, al menos en estos sitios donde crece como exótica (Dvorak, 2003).

1.3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ixtlán de Juárez es una comunidad campesina forestal, tiene 19,310 ha, excluyendo 130 ha de zona urbana. Del total, 12,425 ha son de bosque de pino-encino, el resto de la superficie está cubierta por bosque mesófilo y selva alta perennifolia. Se encuentra localizado al noroeste de la ciudad de Oaxaca, en la región denominada “Sierra de Juárez”, entre los paralelos 17° 18’ 16” y 17° 34’ 00” de latitud norte y los meridianos 96° 21’ 29” y 96° 20’ 00” de longitud oeste, incluida en la provincia fisiográfica denominada “Sistema Montañoso del Norte de Oaxaca”; presenta topografía muy accidentada, con pendientes que en algunos casos fluctúan del 40 al 60%; la altitud está entre los 2200 y 3000 msnm (Consejo Forestal Mundial, 2001).

Presenta diferentes tipos de vegetación:

- a) Bosque de pino-encino es el de mayor importancia, ya que ocupa la mayor parte de la superficie y genera importantes beneficios económicos para la comunidad (Gómez-Cárdenas *et al.*, 1994). Las principales especies de pino son *Pinus oaxacana* y *P. leiophylla*, *P. rudis* (considerada por algunos como *Pinus harwegii*) en las partes más altas y *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, y *P. chiapensis* en las más húmedas, donde también existen bosques que colindan con diversas asociaciones de bosque mesófilo de montaña. En el siguiente estrato inferior, que alcanza hasta 20 m de altura, se encuentran los encinos, principalmente *Quercus crassifolia*, *Q. rugosa* y *Q. laurina* (Rzedowski, 1978).
- b) Bosque de encino-pino. Ocupa el segundo lugar en extensión y corresponde al clima templado sub-húmedo, en el estrato arbóreo predominan los encinos y se observan pinos en forma dispersa que alcanzan los 25 m de altura.
- c) Bosque mesófilo de montaña. Corresponde al clima templado húmedo y se encuentra dentro del conjunto de las comunidades localizadas en las zonas montañosas. En este tipo de bosque se encuentran como especies dominantes en el estrato arbóreo: *Liquidambar styraciflua*, conviviendo con manchones de *Pinus chiapensis*. Es un bosque denso, por lo general de 15 a 35 m de alto y algunos árboles llegan a medir más de 50 m de altura.
- d) El bosque de encino. Con climas templados húmedos y subhúmedos; en el estrato superior dominan encinos de 15 a 20 y hasta 30 m de altura,

acompañados por algunos individuos de *Pinus patula* y *P. pseudostrobus* principalmente.

- e) Selva baja caducifolia. Con temperatura media anual superior a 18° C. Este tipo de vegetación se localiza en el extremo suroeste cercano al poblado de Ixtlán de Juárez. En el estrato arbóreo superior se presentan algunos individuos de *Quercus*, que conviven con especies típicas de bosque tropical caducifolio.
- f) Vegetación secundaria. Derivada del bosque de encino-pino, en el suroeste de la comunidad. En el estrato arbóreo superior, se presentan en forma dispersa algunos encinos de escasa altura (3 a 6 m) y otras latifoliadas, así como algunos individuos de *Pinus teocote* y *P. michoacana* en pequeñas agrupaciones.
- g) La vegetación secundaria derivada del bosque de pino-encino ocupa menor extensión. Se localiza en un área muy cercana hacia el norte de la población de Ixtlán y en pequeños manchones al este del mismo poblado. En el estrato superior presenta principalmente algunas especies de *Quercus* que conviven con *Pinus oaxacana*, *P. teocote* y *P. leiophylla*. En general, estos elementos se encuentran muy dispersos y llegan a dominar el estrato arbustivo y, en algunos casos, el herbáceo, principalmente en los lugares donde se han eliminado los estratos superiores.

1.4 HIPÓTESIS

- Existe diferenciación genética entre las poblaciones de *Pinus patula* Schltld. & Cham. de la región de Ixtlán de Juárez Oaxaca a lo largo de un gradiente altitudinal para caracteres de crecimiento.
- Hay un patrón altitudinal de variación genética en caracteres de crecimiento entre poblaciones de de *Pinus patula* Schltld. & Cham.de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.
- El desempeño en crecimiento de las poblaciones de *Pinus patula* Schltld. & Cham., se puede predecir mediante evaluaciones de ensayos de procedencias que se realicen desde edades tempranas.

1.5 LITERATURA CITADA

- Campbell, R. K. and Sugano A. I. 1993. Genetic Variation and seed zones of Douglas-Fir in the Siskiyou National Forest. Res. Pap. PNW-RP-461. Portland, Oregon: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 23 p.
- CONAFOR 2008. Programa Institucional 2007-2012. 1ª ed. SEMARNAT-CONAFOR 60 p.
- CONAFOR 2001 Programa estratégico forestal para México 2025. Informe final. SEMARNAT-CONAFOR, 191 p.
- Consejo Forestal Mundial (Forest Stewardship Council o FSC) y SmartWood 2001 Resumen público de certificación www.smartwood.org (accedida julio de 2009).
- Dvorak, W. S. 2003. *Pinus patula*. Species description, En: Vozzo J. A. (Ed.) Tropical Tree Seed Manual. Department of Forestry, United States Department of Agriculture Forest Service, pp 632-635 .
- Dvorak, W. S., Hodge G. R., Kietza J. E., Malan F., Osorio L. F. and Stranger T. K. 2000. *Pinus patula*. En: CAMCORE (Ed.) Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the Camcore Cooperative Department of Forestry, North Carolina State University. pp 148-173.
- Farjon A. and Styles B. T. 1997. Flora neotrópica Monograph 75 Pinus (Pinacea). New York Botanical Garden, 291 p.
- Gómez-Cárdenas, M., Vargas-Hernández J., Jasso Mata J. Velázquez Martínez A. y Rodríguez Franco C. 1998. Patrón de crecimiento anual del brote terminal en árboles jóvenes de *Pinus patula*. Agrocienca 32: 357-364.

- Luna-Rodríguez, M., López-Upton J. E. e Iglesias-Andreu L. G. 2005. Variabilidad morfológica y molecular (RAPD) en una plantación de *Pinus patula* en Veracruz, México. *Agrociencia* 39: 231-235.
- Martínez M. 1948. Los pinos mexicanos. 1ª ed. Ed. Botas. México. 362 p.
- Mendizábal-Hernández, L., Alba-Landa J. y Rebolledo-Camacho V. 1999. Prueba de procedencia/progenie de *Pinus oocarpa* Shiede en el Municipio de E. Zapata, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 1(2): 9-12.
- Meza-Juárez, D. J., Vargas-Hernández J. J., López-Upton J., Vaquera-Huerta H., y Borja-de la Rosa A. 2005. Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura en *Pinus patula* Schl et Cham. *Ra Ximhai* 1(2): 305-324.
- Perry, P. J. 1991. *The Pines of Mexico and Central America*. Timber Press. Portland, Oregon. 231 p.
- Rzedowski J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, México. 432 p.
- Sáenz-Romero C., 2004. Zonificación y conservación de coníferas en México. En: Vera C. G., Vargas H. J. y Dorantes L. J. (Eds.) *Uso y conservación de recursos genéticos forestales*. CONAFOR, 15-19.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero C., López Upton J. y Vargas Hernández J. 2005. Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrabus* Lindl. en campo. *Agrociencia* 39: 575-587.
- Wormald, T. J. 1975. *Pinus patula*. Tropical Forestry Papers No. 7 Tropical Forestry Institute. Commonwealth Forestry Institute. Oxford, England, 172 p.
- Zobel, B. y Talbert J. 1992. *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. Edit. Limusa, 1ª edición, México, 547 p.

2. VARIACIÓN GENÉTICA ENTRE PROCEDENCIAS DE *Pinus patula* Schldt. & Cham EN ENSAYO DE VIVERO.

RESUMEN

Con el objetivo de determinar un posible patrón de variación genética altitudinal entre procedencias de *Pinus patula* Schldt. et Cham., se colectaron en un transecto altitudinal semillas de 13 poblaciones de *Pinus patula* en bosques de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, entre 2400 y 3000 m de altitud, en sitios separados por 50 m de altitud. Las semillas se sembraron en un ensayo de procedencias en un vivero de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. El diseño experimental fue de bloques completos al azar, con 13 procedencias, tres bloques y 49 plantas por parcela. Las variables a evaluar fueron: altura a los 3, 6 y 9 meses de edad y diámetro a los 6 y 9 meses. Se encontraron diferencias significativas entre procedencias para altura a los 3 y 6 meses y en diámetro basal a los 6 meses de edad. En todas las evaluaciones realizadas, se observó una tendencia entre altitud de origen y crecimiento en altura y diámetro, donde las poblaciones de altitud de origen intermedias crecieron más que las de los extremos. En particular la procedencia originaria de 2,650 m mostró mayor crecimiento.

Palabras clave: *Pinus patula*; procedencias; variación genética altitudinal; vivero; Ixtlán de Juárez; Oaxaca.

2. GENETIC VARIATION AMONG *Pinus patula* Schldt. & Cham PROVENANCES IN NURSERY TEST.

ABSTRACT

In order to determine a possible altitudinal pattern of genetic variation among provenances of *Pinus patula* Schldt. et Cham., seeds of 13 populations of *Pinus patula* were collected along an altitudinal transect in the natural forest of the native Indian community of Ixtlán de Juárez, Oaxaca, between 2400 and 3000 m from altitud, sampled populations were separated by an altitudinal interval of approximately 50 m. The seeds were sowed at a nursery, in a provenance test in the community of Ixtlán de Juárez, Oaxaca. The test had a randomized complete block design, with 13 provenances, three blocks and 49 plants per plot. Measured variables were: height at 3, 6 and 9 months of age and diameter at 6 and 9 months. There were significant differences among provenances for height at 3 and 6 months and basal diameter at 6 months of age. In all assessments, there was a trend between altitude of origin and growth in height and diameter, according to which the populations of intermediate altitude origin grew faster than the ones originating at the extremes. In particular, the provenance originated from 2,650 m showed greater growth.

Key words: *Pinus patula*; provenances; altitudinal genetic variation; nursery; Ixtlán de Juárez; Oaxaca.

2.1 INTRODUCCIÓN

Los ensayos de procedencia son importantes, particularmente durante las fases iniciales de programas de reforestación o mejoramiento genético, ya que proveen de información acerca de la diferenciación genética entre procedencias de la especie que se utiliza, maximizando la ganancia para un área determinada (Isik *et al.*, 2000). En México se ha producido semilla de *Pinus patula*, en algunas áreas semilleras en los estados de Puebla, Veracruz, Tlaxcala Hidalgo y Oaxaca (Dvorak, 2003). En los últimos 25 años, se ha colectado semilla de procedencias identificadas a lo largo de todo el rango de distribución natural de la especie, que posteriormente se distribuyeron en diferentes países de África, Sudamérica y México, en donde se han efectuado ensayos de procedencias y progenies y se han establecido bancos de conservación genética. Sin embargo, la semilla de *P. patula*, utilizada como especie exótica en otros países, inicialmente se llevó a cabo con lotes de semilla de origen desconocido (Dvorak, 2003).

Las procedencias originarias del noreste de Oaxaca han mostrado un potencial productivo superior a las originarias en otros sitios, cuando son crecidas en condiciones ambientales favorables, esto se observó en procedencias que se han establecido en Colombia, aunque han mostrado más susceptibilidad al daño por heladas en plantaciones establecidas en otros países en evaluaciones a los 3 y 8 años (Dvorak *et al.*, 2000).

Algunas especies forestales presentan patrones altitudinales en la expresión de su desarrollo. El conocimiento de estos patrones, permite establecer zonas de colecta y áreas de conservación genética, para hacer un movimiento adecuado de semillas que permitan el mejor desarrollo de las plantas cuando éstas son establecidas en sitios diferentes a su lugar de origen (Sáenz-Romero *et al.*, 2006).

Es necesario realizar evaluaciones de variación genética para caracteres de crecimiento, ya que dichos estudios proporcionan información tanto del potencial productivo de las especies como de las posibilidades de adaptación a condiciones ambientales específicas en el sitio de plantación (Salazar-García *et al.*, 1999).

Si existe variación genética entre procedencias, a lo largo de un gradiente ambiental puede significar que cada población está adaptada a una porción del gradiente ambiental total ocupado la especie y que dicha especie tiene la capacidad de adaptarse a ambientes heterogéneos, de acuerdo a diferentes estrategias evolutivas (Rehfeldt, 1993; Vitasse *et al.*, 2009). Esta capacidad de adaptación permite a los árboles responder a las condiciones ambientales nuevas o diferentes a las de su ambiente de origen, ya sea adaptándose reduciendo o aumentando su crecimiento, o muriendo (Salazar-García *et al.*, 1999, Vitasse *et al.*, 2009).

La mayoría de las especies forestales económicamente importantes son de lento crecimiento e intervalos de generación muy largos, por lo que resulta impráctico y casi imposible esperar este tiempo para llevar a cabo selección de los mejores individuos. La alternativa es la selección temprana, que se realiza mediante evaluaciones en ensayos de procedencias o progenies desde las edades más temprana posible, con el fin de lograr mayores ganancias en crecimiento por unidad de tiempo (Marques Jr. *et al.*, 1995). Las evaluaciones tempranas pueden enfocarse a la búsqueda de relaciones de caracteres, tendencias y proyecciones similares entre edades tempranas y tardías del desarrollo, y pueden servir para: identificar los mejores genotipos desde edades tempranas en base al desempeño de las plántulas que, se espera, tendrán los mejores crecimientos en edades adultas, con el fin de aumentar ganancia genética por unidad de tiempo y reducir el tamaño de los ensayos de campo posteriores mediante el incremento de la precisión estadística y reducción de los costos de establecimiento (Sánchez-Vargas *et al.*, 2008; Adams *et al.*, 2001).

2.2 OBJETIVOS

- Se pretende determinar si existe diferenciación genética entre poblaciones de *Pinus patula* colectadas a lo largo de un gradiente altitudinal, para caracteres cuantitativos, a partir de un ensayo de procedencias en vivero.
- Hacer una selección temprana de las procedencias apropiadas para plantaciones con esta especie en la región.

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1 Establecimiento del ensayo

Previo al establecimiento del ensayo en vivero, se colectaron semillas de 13 poblaciones de *Pinus patula* en los bosques de la comunidad indígena de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. La colecta se realizó siguiendo un gradiente altitudinal, desde los 2400 m de altitud hasta los 3000 m, en 13 sitios de colecta, separados por una diferencia altitudinal de 50 m entre cada sitio. En cada sitio se colectaron las semillas de al menos 11 árboles seleccionados al azar, entre los árboles que al momento de la colecta (enero-abril del 2006 y del 2007) presentaban conos maduros y ausencia de daños evidentes por plagas y enfermedades (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ubicación de las poblaciones de *P. patula* colectadas a lo largo de un transecto altitudinal en los bosques de la comunidad indígena de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México (Todas con exposición suroeste).

Procedencia	Altitud	Lat N	Long W
3	3000	17°22.270'	96°26.987'
4	2950	17°23.154'	96°27.402'
5	2900	17°23.185'	96°27.839'
6	2850	17°21.793'	96°27.399'
7	2800	17°21.795'	96°27.562'
8	2750	17°23.004'	96°28.577'
9	2700	17°21.749'	96°27.880'
10	2650	17°23.162'	96°28.938'
11	2600	17°23.059'	96°28.861'
12	2550	17°22.902'	96°28.902'
13	2500	17°22.808'	96°29.067'
14	2450	17°22.679'	96°28.986'
15	2400	17°22.353'	96°28.971'

Los conos de los árboles colectados individualmente, se mezclaron por procedencia, procurando que cada árbol estuviera representado al menos con ocho conos por árbol y no más de 15 conos por árbol. Las semillas se obtuvieron secando al sol los conos y extrayendo la semilla golpeando manualmente dos conos entre sí. El desalado se realizó manualmente, frotando la semilla entre las manos y separando la basura por aire o manualmente.

Dos poblaciones que corresponderían a las procedencias más altas (3,050 y 3,100 m de altitud; poblaciones 1 y 2 respectivamente), se colectaron pero se encontraron árboles con muy pocos conos y éstos con muy poca semilla, por lo que se decidió no incluir estas poblaciones en el estudio.

Las semillas se sembraron por siembra directa, en envases de plástico rígidos en un vivero de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, en noviembre del 2007. Se utilizaron envases rígidos de plástico con capacidad de 125 cm³, en los cuales se colocó un sustrato compuesto con 50 % de turba (Peat moss®), 25 % de perlita y 25 % de agrolita. El diseño experimental fue de bloques completos al azar, con 14 procedencias, tres bloques y 49 plantas por parcela. Los contenedores se dispusieron en charolas-porta-contenedores de 49 cavidades (7 x 7 contenedores), cada bloque rodeado de una hilera de charolas con planta de la misma especie, como faja de protección.

Las variables a evaluar fueron: altura total de la planta (cm) a las edades de tres (febrero), seis (mayo) y nueve meses (agosto) a partir de la siembra y diámetro a la base (mm) a los seis y nueve meses, para lo cual se utilizó una regla de plástico y vernier digital, respectivamente.

2.3.2 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza con el procedimiento Proc GLM de SAS (1999), para detectar diferencias entre procedencias. Se obtuvieron los componentes de la varianza con el Procedimiento VARCOMP para estimar el porcentaje de la contribución de los componentes de la varianza a la varianza total. Se realizó un análisis de regresión (Proc REG de SAS) entre el promedio por población y la altitud de origen de la procedencia, con la finalidad de determinar si existe un patrón de diferenciación altitudinal. Se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + B_j + P_i * B_j + e_{ijk}$$

En donde Y_{ijk} = observación del $k^{\text{ésimo}}$ individuo de la $i^{\text{ésima}}$ procedencia en el $j^{\text{ésimo}}$ bloque; μ = media general; P_i = $i^{\text{ésima}}$ procedencia; B_j = $j^{\text{ésimo}}$ bloque; $P_i * B_j$ = interacción de la $i^{\text{ésima}}$ procedencia con el $j^{\text{ésimo}}$ bloque y e_{ijk} = error experimental.

Se realizó un análisis de regresión (Proc REG de SAS), entre el promedio por población y la altitud de origen de la procedencia, con la finalidad de determinar si existe un patrón de diferenciación altitudinal. Se ajustó el siguiente modelo cuadrático:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + e_{ij}$$

En donde Y_{ij} es la altura de planta promedio esperada de cada población, β_0 es el intercepto, β_1 y β_2 son los parámetros de regresión, X_i es la altitud origen de la $i^{\text{ésima}}$ población y e_{ij} es el error

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre procedencias, en la variable altura de la planta a la edad de 3 y 6 meses y diámetro a los 6 meses; así como diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre bloques a los 3 y 9 para altura y a los 6 meses para diámetro; y para la interacción bloque-procedencia en el crecimiento en altura y en diámetro a las tres edades (Cuadro 2). Se han encontrado diferencias significativas entre poblaciones para las mismas variables en evaluaciones de ensayos de procedencias en vivero a edades tempranas con otras especies del género *Pinus* (Viveros-Viveros et al., 2009).

Cuadro 2. Porcentaje de contribución a la varianza total (%) de altura y diámetro, y significancia (p) por edad para las 13 procedencias de *Pinus patula*.

Variable	Procedencia		Bloque		Bloque*Proc.		Error %
	%	p	%	p	%	p	
Altura 3 meses	4.32	0.007	12.01	<0.0001	3.86	<0.0001	79.81
Altura 6 meses	5.59	0.032	0.51	0.296	13.42	<0.0001	80.47
Altura 9 meses	3.61	0.116	7.43	0.012	31.78	<0.0001	57.18
Diámetro 6 meses	2.56	0.043	2.32	0.008	4.64	<0.0001	90.47
Diámetro 9 meses	2.64	0.127	1.80	0.189	18.95	<0.0001	76.62

El análisis del promedio de crecimiento por procedencia, en relación a la elevación de origen de las procedencias para ambas variables en las tres edades, indica que las procedencias originarias de la parte media de distribución altitudinal en la zona, crecieron más que las de los extremos superior e inferior altitudinal. Existe un patrón altitudinal significativo en el modelo de regresión cuadrático para la variable altura a los 3 meses de edad (Fig. 2), no así para el resto de las evaluaciones (Figs. 3, 4, 5 y 6). Los mismos resultados se han observado en otros ensayos de procedencias, con otras especies del género *Pinus* (Saenz-Romero et al., 2006). Estos resultados confirman que los genotipos de rápido crecimiento, se originan en sitios con condiciones óptimas, mientras que los genotipos que se

distribuyen en la periferia del rango de distribución o aquellos de poblaciones aisladas, son más susceptibles a sufrir daños debido a las condiciones de clima extremos y por tanto, tienden a crecer más lentamente (Isik *et al.*, 2000). El comportamiento de crecimiento es similar en las tres edades: las procedencias que mostraron mayor y menor crecimiento desde la primera evaluación, conservan una tendencia similar de crecimiento en las edades posteriores (Figs. 2, 3, 4, 5 y 6).

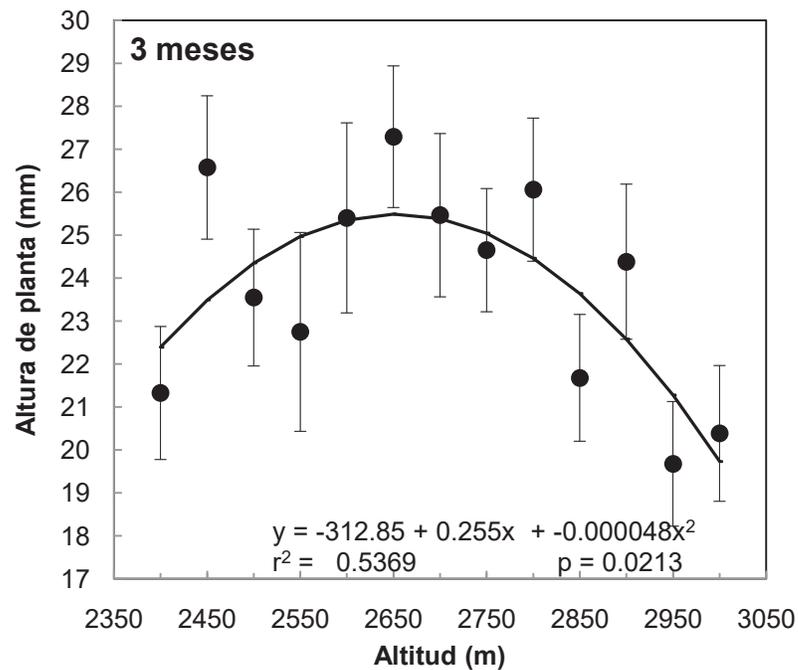


Figura 2. Comparación de medias de crecimiento en altura de planta para cada procedencia y su altitud de origen a los 3 meses de edad. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza al 95%.

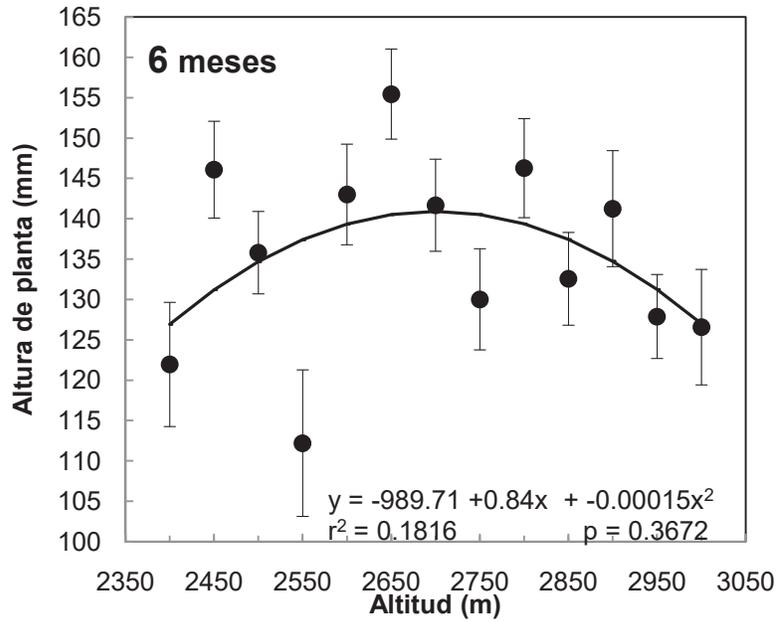


Figura 3. Comparación de medias de crecimiento en altura de planta para cada procedencia y su altitud de origen a los 6 meses de edad. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza al 95%.

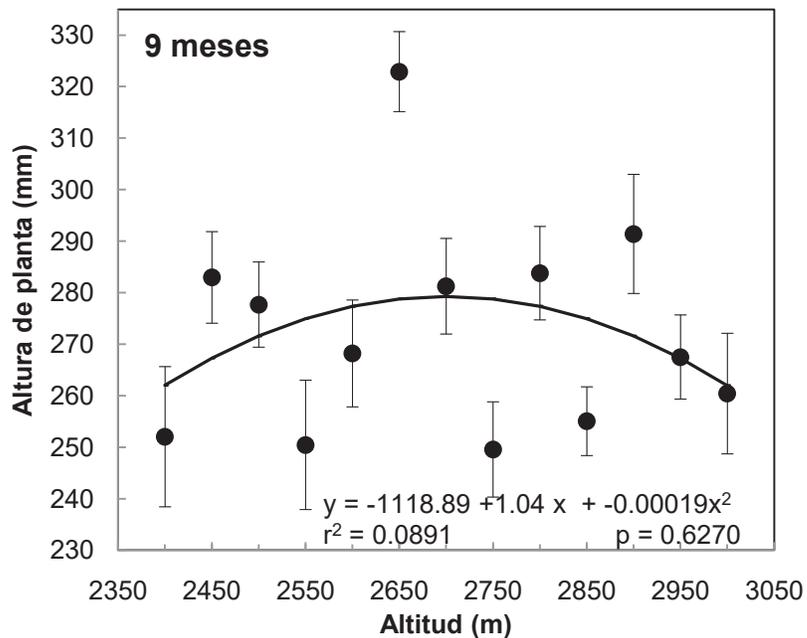


Figura 4. Comparación de medias de crecimiento en altura de planta para cada procedencia y su altitud de origen a los 9 meses de edad. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza al 95%.

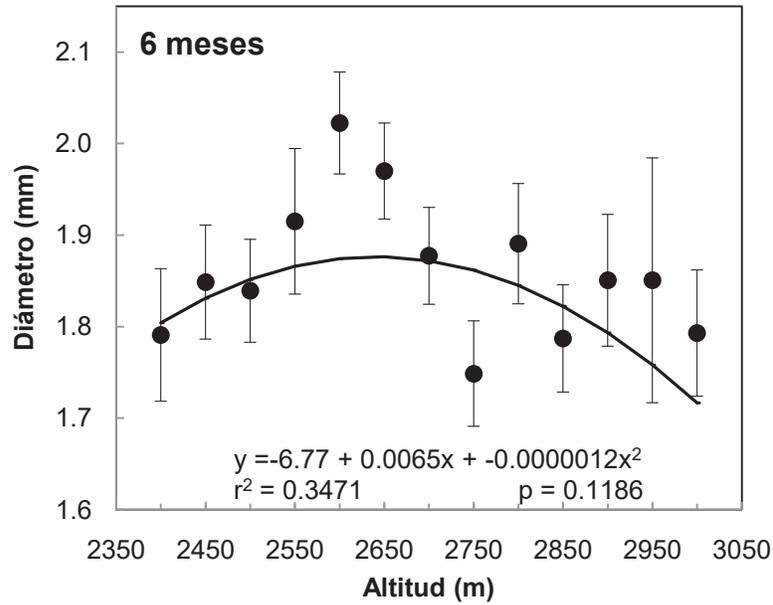


Figura 5. Comparación de medias de crecimiento en diámetro de planta para cada procedencia y su altitud de origen a los 6 meses de edad. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza al 95%.

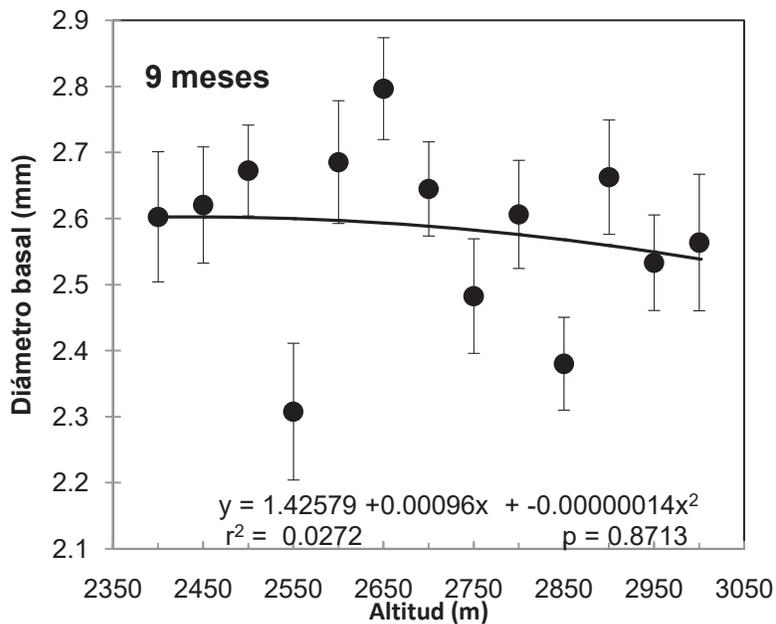


Figura 6. Comparación de medias de crecimiento en diámetro de planta para cada procedencia y su altitud de origen a los 9 meses de edad. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza al 95%.

La comparación múltiple de medias por procedencia en altura a los 3 y 6 meses de edad y diámetro a los 6 meses de edad, muestran diferencias significativas, en donde las procedencias originarias aproximadamente de la parte central del rango de distribución de *Pinus patula* en la zona, conformaron el grupo de mayor crecimiento para los caracteres evaluados, según la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) (Cuadro 4). La procedencia originaria de 2650 metros destaca por su mayor crecimiento promedio en altura en las tres edades evaluadas, así como en diámetro en las dos edades, mientras que las poblaciones originarias de los extremos, principalmente del extremo altitudinal superior, tuvieron crecimiento notablemente menor para diámetro y altura en las tres edades. Estos resultados coinciden con los obtenidos en evaluaciones para otras especies de *Pinus* (Viveros-Viveros et al., 2009, Sáenz-Romero et al 2006). Generalmente se asume que este comportamiento de poblaciones originadas a mayores altitudes se debe a la adaptación a ambientes fríos, de manera que las procedencias presentan crecimiento más lento, como forma de adaptación que les permite sobrevivir en climas fríos y tolerar heladas prematuras o tardías, principalmente durante los primeros años de edad de la planta (Vitasse et al., 2009).

Las procedencias originarias de 2550 y 2950 m de altitud, fueron las de menor crecimiento promedio en altura.

Cuadro 4. Medias por procedencia, para altura y diámetro a distintas edades. Las letras indican agrupamiento según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$).

Proc	Altitud	Altura (mm)						Diámetro (mm)		
		3 meses		6 meses		9 meses	6 meses		9 meses	
		Media	Tukey	Media	Tukey	Media	Media	Tukey	Media	
10	2650	27.3	A	155	A	323	1.97	A B	2.80	
14	2450	26.6	A	146	A B	283	1.85	A B	2.62	
7	2800	26.1	A B	146	A B	284	1.89	A B	2.61	
9	2700	25.5	A B	142	A B	281	1.88	A B	2.64	
11	2600	25.4	A B	143	A B	268	2.02	A	2.69	
8	2750	24.7	A B	130	A B	250	1.75	B	2.48	
5	2900	24.4	A B	141	A B	291	1.85	A B	2.66	
13	2500	23.5	A B	136	A B	278	1.84	A B	2.67	
12	2550	22.8	A B	112	B	250	1.91	A B	2.31	
6	2850	21.7	A B	133	A B	255	1.79	A B	2.38	
15	2400	21.3	A B	122	A B	252	1.79	A B	2.60	
3	3000	20.4	A B	127	A B	260	1.79	A B	2.56	
4	2950	19.7	B	128	A B	267	1.85	A B	2.53	

Los resultados aún no son concluyentes, debido a que las evaluaciones se realizaron a edades muy tempranas y es necesario complementar con información de ensayos en campo en edades posteriores, para confirmar o modificar la tendencia de comportamiento de las poblaciones.

2.5 CONCLUSIONES

Existe diferenciación genética significativa entre procedencias para altura de la planta a los 3 y 6 meses de edad y para diámetro a los 6 meses de edad.

La procedencia 10, originaria de 2,650 m de altitud, mostró un crecimiento superior a las demás en la mayoría de las mediciones y sólo fue ligeramente inferior en la evaluación de diámetro a los 9 meses. Podría seleccionarse preliminarmente como sitio para fuente de semilla, para plantaciones con esta especie en la región.

Se puede observar un patrón altitudinal débil, según el cual las procedencias originarias de las elevaciones intermedias, muestran crecimiento ligeramente superior a las procedencias originarias de los límites altitudinales superior e inferior de distribución de la especie en la región.

2.6 LITERATURA CITADA

- Adams, W. T., Aitken S. N., Joyce D. G., Howe G. T. and Vargas-Hernández J. 2001. Evaluating efficacy of early testing for stem growth in coastal Douglas-fir. *Silvae Genetica* 50:167-175
- Dvorak, W. S. 2003. *Pinus patula*. Species description, En: Vozzo J. A. (Ed.) Tropical Tree Seed Manual. Department of Forestry, United States. Department of Agriculture Forest Service, pp. 632-635.
- Dvorak, W. S., Hodge G. R., Kietza J. E., Malan F., Osorio L. F. and Stranger T. K. 2000. *Pinus patula*. En: CAMCORE (Ed.) Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the Camcore Cooperative Department of Forestry. North Carolina State University. pp 148-173.
- Isik, F., Keskin S. and McKeand S. E. 2000. Provenance variation and provenance-site interaction in *Pinus brutia* Ten.: Consequences of defining breeding zones. *Silvae Genetica* 49: 213-223.
- Marques Jr., O. G., Andrade H. B. and Ramalho M. A. P. 1995. Assessment of the early selection efficiency in *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. In the northwest Minas Gerais State (Brazil). *Silvae Genetica* 45: 359-361
- Mesén, F. 2003. Estado de los Recursos Genéticos Forestales en América Central, Cuba y México, y Plan de Acción Regional para su Conservación y Uso Sostenible. Documentos de Trabajo: Recursos Genéticos Forestales. FGR/52S Servicio de Desarrollo de Recursos Forestales, Dirección de Recursos Forestales, FAO, Roma.
- Rehfeldt, G. E. 1994. Evolutionary genetics, the biological species, and the ecology of the interior Cedar-Hemlock Forests. Ecology and Management Intermountain Research Station Forest Service USDA Forestry Sciences Laboratory, Moscow, pp. 91-100.

- Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna R., and Rehfeldt G. E. 2006. Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, México; implications for seed zoning, conservation of forest genetic resources, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management* 229:340-350.
- Salazar-García, J., Vargas-Hernández J., Jasso-Mata J., Molina-Galán J., Ramírez-Herrera C. y López-Upton J. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5(2): 19-34.
- Sánchez-Vargas, N., Cambrón Sandoval V. H., Sáenz-Romero C. y Vargas Hernández J. J. 2008. Parámetros genéticos del crecimiento temprano de familias de medios hermanos de *Pinus pseudostrobus* Lindl en Michoacán México. *Revista Forestal Venezolana* En prensa.
- SAS Institute Inc (1999) SAS/STAT Computer Software. Release 8. SAS Institute Inc, Cary, North Carolina, 3rd Edition.
- Vitasse, Y., Delzon S., Bresson C. C., Michalet R. and Kremer A. 2009. Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Canadian Journal of Forest Research* 39:1259-1269.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero C., Vargas-Hernández J. J., López-Upton J., Ramírez-Valverde G. y Santacruz-Varela A. 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257(3): 836-842.

3. VARIACIÓN GENÉTICA ALTITUDINAL ENTRE PROCEDENCIAS DE *Pinus patula* Schldt. & Cham EN ENSAYO DE CAMPO

RESUMEN

Las plantas obtenidas de vivero a los 9 meses de edad a partir de la fecha de siembra, se plantaron en dos sitios de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, a dos altitudes contrastantes: 2,500 y 3,000 m, con el objetivo de determinar si existió un patrón de variación genética altitudinal en el crecimiento entre procedencias de *Pinus patula* Schl. et Cham. colectadas a lo largo de un gradiente altitudinal en la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. El diseño experimental en cada sitio fue de bloques completos al azar, con 13 procedencias establecidas en doce bloques con cuatro plantas por parcela. Las variables a evaluar fueron: altura a los 9, 12, 18 y 24 meses de edad y diámetro a los 18 y 24 meses, así como el índice de elongación de yema a los 16 meses. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre procedencias para altura en todas las edades evaluadas en el análisis hecho por sitio. Se encontró interacción genotipo x ambiente moderada ($r_B = 0.36$). Se observó un patrón altitudinal estadísticamente significativo para altura a los 18 y 24 meses, donde las poblaciones de altitud de origen intermedias crecieron más que las de los extremos, con base a estos resultados, se propuso una zonificación para el manejo de semilla y planta en la que se delimitaron tres zonas (Zona I: 2,400 a 2,600 m, Zona II: 2,600 a 2,800 m y Zona III: 2,800 a 3,000 m) que pueden servir como guía útil para la toma de decisiones respecto a la transferencia de semillas en planes de restauración ecológica, conservación de recursos genéticos, mejoramiento genético y adaptación a los efectos del cambio climático. Una procedencia en particular (originaria de 2,650 m) muestra el mayor crecimiento en ambos sitios ensayados.

Palabras clave: *Pinus patula*; procedencias; variación genética altitudinal; zonificación de semillas; cambio climático.

3. ALTITUDINAL GENETIC VARIATION AMONG *Pinus patula* Schldt. & Cham PROVENANCES IN FIELD TEST

ABSTRACT

Seedlings raised at the nursery were planted at two sites in the community of Ixtlán de Juárez, Oaxaca, at two contrasting altitudes: 2,500 and 3,000 m, at the age of 9 months from the date of sowing, with the aim of determining whether there was an altitudinal pattern of genetic variation in growth among provenances of *Pinus patula* Schl. et Cham., collected along an altitudinal gradient in the region of Ixtlán de Juárez, Oaxaca. The experimental design had a randomized complete block design at each site with 13 provenances established in twelve blocks with four plants per plot. Measured variables were: height at 9, 12, 18 and 24 months of age and diameter at 18 and 24 months, and the bud elongation rate at 16 months. We found statistically significant differences among provenances for height at all ages evaluated in the analysis by site. There was moderate genotype x environment interaction ($r_B = 0.36$). There was a statistically significant altitudinal pattern for height at 18 and 24 months, according to which populations of intermediate altitudes of origin grew more than the ones from the extremes. Based on these results, it was proposed zoning for the management of seed and plant which delineated three zones (Zone I: 2,400 to 2,600 m, Zone II: from 2,600 to 2,800 m and Zone III: 2,800 to 3,000 m). This zoning can serve as a useful guide for making decisions about seed transfer plans in ecological restoration, conservation of genetic resources, genetic improvement and adaptation to climate change impacts. One source in particular (originated at 2,650 m) shows the highest growth at both sites tested.

Key words: *Pinus patula*; provenances; altitudinal genetic variation; seed zoning; climatic change.

3.1 INTRODUCCIÓN

Para garantizar el buen éxito de las plantaciones y reforestaciones, es necesario conocer el desempeño de las poblaciones en el lugar en donde se desean plantar. Existen muchos ejemplos de fracasos en el establecimiento de plantaciones y reforestaciones, debido a que no se utiliza la especie o procedencia adecuadas (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros, 2004). Cuando las semillas se mueven indiscriminadamente de un lugar a otro, el desarrollo de los individuos puede ser afectado, especialmente cuando las semillas se colectan en ambientes muy distintos a aquellos en los que se establecen las plantaciones (Campbell, 1979; Rehfeldt, 1988).

Si existe un patrón definido de diferenciación genética altitudinal entre poblaciones, sería recomendable desarrollar lineamientos para decidir el movimiento de semillas y plantas a través de una zonificación altitudinal definida, a fin de garantizar la adaptación de las plantas a los sitios de reforestación (Viveros-Viveros *et al.*, 2005).

La variedad de condiciones microambientales generada por la topografía accidentada de los sistemas montañosos de México, dificulta la detección de patrones ambientales sencillos en los diferentes tipos de vegetación natural. La asociación de las características fenológicas con algunas variables del sitio de origen, aunque débil en algunos casos, indica que la variación detectada entre las poblaciones debe tener valor adaptativo, relacionado con tolerancia a heladas y potencial de crecimiento en altura (Acevedo-Rodríguez *et al.*, 2006).

Al realizar pruebas genéticas con material bajo diferentes condiciones de sitio, pueden obtenerse diferencias entre poblaciones, que varían de acuerdo a las diferentes edades de las plantas. Durante el primer periodo, posterior al establecimiento de los ensayos en campo, la influencia de sitio desempeña un papel menor y las influencias genéticas son mayores. A medida que pasa el tiempo, la influencia de sitio aumenta, hasta finalmente formar parte importante de la variación, y el componente genético puede reducirse simultáneamente (Johnson, 1997).

Cuando las plantas crecen en vivero en condiciones más o menos homogéneas, el crecimiento acumulado que desarrollan puede deberse muy probablemente al efecto del genotipo y error experimental, principalmente. Posteriormente cuando se establecen en campo, las poblaciones comienzan a ser influidas por el ambiente; esta información varía de acuerdo a la edad y clima de cada año (Huehn *et al.*, 1986).

El desempeño de los caracteres de crecimiento, en plántulas de algunas especies forestales, es representativo del posterior desarrollo del árbol a edades más avanzadas, y por tanto puede usarse como indicador para predecir su comportamiento posterior. Si existe dicha correlación entre edades, pueden reducirse el tiempo y los costos mediante la selección de los genotipos óptimos, desde las fases iniciales de crecimiento (Lamberth *et al.*, 1983). Maximizar la ganancia genética por unidad de tiempo, es un objetivo primordial de cualquier programa de mejoramiento. El éxito de la selección temprana está determinado en gran medida por la heredabilidad de las características deseadas de estadíos juveniles a maduros y por las correlaciones genéticas (Xie y Ying, 1996).

En ensayos establecidos con *Pinus patula* por CAMCORE (Central America and Mexico Coniferous Resources Cooperative), se han encontrado altas correlaciones edad-edad para la variable volumen, que sugieren que pueden hacerse selecciones tempranas de los mejores genotipos, para algunas características cuantitativas (Dvorak *et al.*, 2000).

Pinus patula se describe como una especie sensible al sitio donde crece, circunstancia que refleja que su genotipo posee características de plasticidad y adaptabilidad, que la convierten en un recurso genético valioso. El patrón de crecimiento de *P. patula* es libre, lo que indica que mientras las condiciones ambientales sean favorables, las yemas se forman y alargan sin un patrón fijo anual; de este modo, los flujos de crecimiento son varios en un mismo año y varían de acuerdo con la calidad de estación (Velázquez- Martínez *et al.*, 2004).

El ambiente de evaluación puede afectar los resultados finales si existe una fuerte interacción genotipo x ambiente (G x A). Por lo tanto, es importante evaluar el nivel de interacción G x A para mejorar el acoplamiento entre los genotipos de las plantas y los sitios en donde se deben plantar, identificar las poblaciones que tengan un desempeño estable en diferentes sitios y puedan ser utilizadas en mayor variedad de sitios (Sánchez-Vargas *et al.*, 2004). Se conocen diferentes métodos para analizar la interacción G x A, uno de ellos consiste en calcular la correlación genética (tipo B) entre los distintos ambientes, lo que permite determinar que tan similar es la jerarquización de las poblaciones en cada sitio de evaluación. Éste método proporciona una medida cuantitativa de la importancia de la interacción y por lo tanto, de la estabilidad de los genotipos (Pswarayi *et al.*, 1997).

En otros países como Sudáfrica, se han desarrollado extensos programas de plantaciones basados en procedencias mexicanas de *P. patula*, que fueron llevadas a aquel país a principios del siglo pasado y a la fecha han generado abundante información sobre la especie (Velázquez- Martínez *et al.*, 2004). Las características de crecimiento de esta especie, aunadas a su amplio intervalo de adaptación, podrían convertirla en una de las especies más adecuadas y potencialmente exitosas para plantaciones comerciales forestales (Velázquez- Martínez *et al.*, 2004).

Además de la posible reducción en productividad que resulta del uso de fuentes de semilla no adaptadas, la contaminación de recursos genéticos locales debido al polen de procedencias introducidas, también puede ser un problema. Independientemente de los límites que se utilicen para zonificar el movimiento de semilla, las fuentes de abastecimiento de semilla se pueden proteger mediante la creación de áreas de producción de semilla. Las áreas de producción de semilla también aumentan la eficiencia de la recolección y, si se seleccionan cuidadosamente, aseguran que la fuente de semilla contenga árboles superiores al promedio de la población (Ledig, 2004).

La implementación de los procesos de zonificación de semillas requiere que se desarrollen subdivisiones geográficas que agrupen poblaciones de individuos potencialmente entrecruzables, con una constitución genética similar. Debido a la

gran importancia que tiene la elevación sobre las adaptaciones dentro de las poblaciones locales, los procedimientos de zonificación de semillas requieren registros explícitos de las elevaciones de recolección (Conkle, 2004). Es necesario hacer una zonificación provisional de la región con base a información climática, topográfica, edáfica y de vegetación natural, que sirva de herramienta para plantear la asignación de procedencias a los sitios en que se realizará la plantación. La delimitación de zonas de semilla identificadas y las implicaciones de manejo de recursos genéticos, son procesos valiosos para el manejo y administración de recursos forestales (Saenz-Romero, 2004 b).

Se sugiere establecer dentro de cada una de las zonas productoras de semillas al menos una Unidad de Conservación de Recursos Genéticos Forestales (UCRGF). Esta es una zona natural de alguna especie que se considera con prioridad de manejo para garantizar la preservación de una porción de la variabilidad genética, así como permitir a las fuerzas evolutivas, modelar la estructura genética de la población (Sáenz- Romero, 2004 a).

El clima es un factor primario que controla la distribución de las comunidades vegetales y la diferenciación entre poblaciones. El reciente calentamiento global ha inducido respuestas ecológicas y biológicas por parte de las plantas y ha influenciado su distribución y abundancia principalmente en los márgenes de distribución, tanto latitudinales como altitudinales (Lenoir *et al.*, 2008). Los modelos de cambio climático pueden proporcionar estimaciones del clima para puntos específicos de la superficie geográfica, dichas estimaciones son útiles para valorar las respuestas de las plantas al clima. Durante muchos años los genetistas forestales han usado variables geográficas para describir las diferencias genéticas entre poblaciones de las diferentes regiones, ya que se asume que las variables geográficas pueden actuar como sustitutos de las variables climáticas, que son más difíciles de observar y reemplazar estos sustitutos por variables climáticas operativas (Rehfeldt, 2006). Un desempeño diferencial de las poblaciones de una especie, refleja las diferencias adaptativas acumuladas por selección natural en el clima en donde se originaron las semillas. La altura y supervivencia disminuyen si las distancias de transferencia

superan el valor óptimo del clima de la procedencia. El calentamiento global iniciará una redistribución completa de los genotipos dentro de las diferentes especies. Los genotipos de las especies forestales no tienen la capacidad de ajustarse a los cambios predichos por las estimaciones de cambio climático (Tchebankova *et al.*, 2005).

Según estimaciones realizadas con escenarios severo y conservador de cambio climático realizadas por Gómez-Mendoza y Arriaga 2007, *P. patula* se considera una especie moderadamente sensible al cambio climático; es decir su rango de distribución actual, será afectado y se reducirá. Según predicciones hechas por Van Zonneveld *et al.*, (2009) con modelos diferentes para el escenario severo (A2) el área disponible actualmente para esta especie se verá reducida en aproximadamente un tercio para mediados del presente siglo.

3.2 OBJETIVOS

- Se pretende determinar la variación genética entre procedencias de *Pinus patula* de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, por medio del establecimiento de un ensayo de campo.
- Determinar la magnitud de la interacción genotipo-ambiente.
- Desarrollar una zonificación altitudinal para mejorar el acoplamiento entre las plantas y su ambiente, que permita decidir el movimiento de semillas y plantas.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 Establecimiento de ensayo en campo

Con las plantas de *Pinus patula* del ensayo de vivero provenientes de 13 sitios de colecta separados por una diferencia altitudinal de 50 m, desde los 2400 m de altitud hasta 3000 m, de los bosques de la comunidad indígena de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, se estableció un ensayo de campo en la estación de lluvias del año 2008. Al plantar en campo el experimento las plantas tenían nueve meses de edad a partir de la fecha de siembra. El experimento se plantó en dos sitios con altitudes contrastantes, ubicados cerca de los extremos superior e inferior de la distribución altitudinal de la especie en la región. Un sitio seleccionado fue a 3000 m de altitud (17° 23.157' LN, 96° 27.309' LW, sobre la brecha 1031, antes de La Cumbre, con dirección de la carretera Ixtlán-Tepanzacualco), al que se denominará "Sitio Alto", y otro sitio a 2500 m de altitud (sobre la Brecha 1027, cerca de la plantación de la Chiyayana, 17° 22.480 LN, 96 ° 28.580 LW) al que se denominará "Sitio Bajo". Cada ensayo tuvo un diseño de bloques completos al azar, con trece procedencias de *Pinus patula*, doce bloques y cuatro árboles en línea por parcela, plantados con un espaciamiento de 2.5 m, usando dos franjas de protección de las mismas procedencias ensayadas.

Las variables a evaluar fueron: altura (cm) a los 12, 18 y 24 meses y diámetro basal (mm) a los 18 y 24 meses de edad de la planta, contados a partir de la germinación (noviembre 2008, que equivalen a una permanencia en el campo de 3, 8 y 15 meses), así como la supervivencia a los 12, 16, 18 y 24 meses.

También se evaluó el estado fenológico de la yema a los 16 meses de edad (marzo 2009), mediante un índice fenológico que representa el estado de desarrollo de la yema apical, basado en la metodología utilizada por Viveros-Viveros *et al.* (2005). La evaluación utiliza un índice con valores de 0 a 6, en donde 0 = yema en dormancia, 1 = yema hinchada e iniciando su crecimiento, 2 = alargamiento medio del brote, 3 = alargamiento completo del brote pero sin fascículos evidentes, 4 = brote completamente alargado, con aproximadamente 25% de su longitud cubierto

con fascículos; 5 = brote bien desarrollado, con fascículos que cubren de 50 a 75% del brote; 6 = brote desarrollado, cubierto en su totalidad por fascículos. Los individuos que presentaron un segundo ciclo de crecimiento, fueron evaluados con el mismo sistema del primer ciclo (índice de 0 a 6), pero sumando a este el valor del ciclo anterior.

3.3.2 Análisis de datos

3.3.2.1 Análisis conjunto de ambos sitios

Se realizó un análisis de varianza con el procedimiento Proc GLM de SAS (1999), para detectar diferencias entre procedencias, usando el siguiente modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + B_j(S_i) + P_k + S_i^*P_k + B_j(S_i)^*P_k + e_{ijkl} \quad [1]$$

En donde Y_{ijkl} = observación del $i^{\text{ésimo}}$ individuo de la $k^{\text{ésima}}$ procedencia en el $j^{\text{ésimo}}$ bloque dentro del $i^{\text{ésimo}}$ sitio; μ = media general; S_i = $i^{\text{ésimo}}$ sitio; $B_j(S_i)$ = $j^{\text{ésimo}}$ bloque anidado en el $i^{\text{ésimo}}$ sitio; P_k = $k^{\text{ésima}}$ procedencia; $S_i^*P_k$ es la interacción del $i^{\text{ésimo}}$ sitio por la $P_k = k^{\text{ésima}}$ procedencia, $B_j(S_i)^*P_k$ es la interacción de la $k^{\text{ésima}}$ procedencia por el $j^{\text{ésimo}}$ bloque anidado en el $i^{\text{ésimo}}$ sitio; e_{ijkl} = error experimental.

Para este análisis se omitieron los datos de los bloques 10, 11 y 12 del sitio de menor altitud, debido a que esos bloques se ubican en una parte baja del terreno, en donde aparentemente se asienta aire frío durante los días con heladas. La mortalidad y daños de las plantas a la edad de 24 meses en estos bloques fueron mayores al 50% debido al daño por heladas. Por consiguiente, se consideró que el desempeño de las plantas en estos tres bloques de este sitio no era representativo del desempeño de los genotipos.

Se obtuvieron los componentes de la varianza con el procedimiento VARCOMP, para estimar el porcentaje de la contribución de los componentes de la varianza a la varianza total utilizando el modelo [1].

Se estimó la interacción genotipo x ambiente para todas las variables y la estabilidad en el desempeño de las procedencias para la variable altura a los 24 meses de edad, a partir de la correlación tipo B (r_B) entre los dos sitios (Sánchez-Vargas *et al.*, 2004), con la siguiente fórmula:

$$r_B = \sigma^2_P / (\sigma^2_P + \sigma^2_{SP}) \quad [2]$$

En donde r_B = correlación genética entre poblaciones de sitios, σ^2_P = componentes de la varianza de las procedencias y σ^2_{SP} = componentes de la varianza de la interacción sitio por procedencia.

Con la finalidad de explorar el patrón de variación entre sitios por procedencias, el rango de las medias de crecimiento en altura de las procedencias a los 24 meses de edad de cada sitio se dividió en cuatro grupos de desempeño (Proc RANK de SAS), para crear cuatro categorías de crecimiento (a = superior, b = medio-superior, c = medio-inferior y d = inferior) con el propósito de comparar el desempeño de las poblaciones entre los sitios y observar la estabilidad o inestabilidad de cada población entre ambos sitios.

3.3.2.2 Análisis por sitio

Se realizó un análisis de varianza para cada sitio. Para este análisis se omitieron los datos de los bloques 10, 11 y 12 del sitio de menor altitud, debido a que en el área en que se encuentran ubicados estos bloques hay una depresión del terreno que contribuyó a limitar el crecimiento respecto al resto del sitio, y que probablemente se debió a la concentración de aire frío en la zona.

Para el análisis de varianza se usó el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + P_j + P_i * B_j + e_{ijk} \quad [3]$$

Se calcularon correlaciones de la variable altura entre la etapa de vivero a los 6 meses de edad y la de campo a los 24 meses de edad, para el sitio de menor altitud, así como correlaciones entre las edades 12 y 24 meses (Proc CORR de SAS), para evaluar la posibilidad de hacer selecciones tempranas de las mejores procedencias para un sitio determinado.

Se realizó un análisis de regresión (Proc REG de SAS), entre el promedio por población y la altitud de origen de la procedencia, con la finalidad de determinar si existía un patrón de diferenciación altitudinal. Se ajustó un modelo lineal y uno cuadrático. El modelo lineal fue:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_{ij} \quad [4]$$

Y el cuadrático:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + e_{ij} \quad [5]$$

En donde Y_{ij} es la altura promedio esperada de cada población, β_0 es el intercepto, β_1 y β_2 son los parámetros de regresión, X_i es la altitud origen de la $i^{\text{ésima}}$ población y e_{ij} es el error.

3.3.2.3 Zonificación altitudinal

Una vez que se demostró que existe diferenciación genética altitudinal entre procedencias, y que ésta diferenciación sigue un patrón altitudinal bien definido; se procedió a construir una zonificación altitudinal para decidir el movimiento de semillas de *P. patula* en la región de Ixtlán de Juárez. Lo anterior se realizó estimando la magnitud de las diferencias mínimas significativas entre las medias por procedencia, mediante la diferencia múltiple de medias (DMS, $\alpha = 0.20$) con la siguiente fórmula:

$$DMS = t_{\alpha/2, g.l.=N-k} \sqrt{(CME)/n} \quad [6]$$

En donde $t = t$ de Student; $\alpha =$ error alfa (0.2); g. l. = grados de libertad, $N =$ tamaño total de muestras; $k =$ número de poblaciones comparadas; $CME =$ cuadrado medio del error como estimador de la varianza entre poblaciones; $n =$ tamaño de muestra por población.

Para realizar la delimitación altitudinal, por simplificación para el manejo, se decidió usar el modelo de regresión lineal y excluir la procedencia originaria de 2400 m. ya que esta procedencia originaria del extremo altitudinal inferior (2400 m), presentó un comportamiento en crecimiento disímil al resto de las procedencias. Sin embargo, el valor de diferencia mínima significativa usado fue el derivado del modelo con el mejor ajuste (el cuadrático) e incluyendo todas las poblaciones.

Para obtener la zonificación primero se decidió establecer una primera línea horizontal que interceptara la línea de regresión predicha por el modelo lineal. Esto se hizo de manera un tanto arbitraria a los 115 cm de altura de las plantas (en el eje Y), y en paralelo al eje X, pero procurando incluir las poblaciones de mayor crecimiento de la parte central de la distribución altitudinal. A partir de esta línea se trazó la siguiente línea paralela a una distancia de 11 cm sobre el eje Y (altura de plantas), que equivale a la Diferencia Mínima Significativa (DMS, $\alpha = 2$), debajo de la primera. Posteriormente, los límites de cada zona altitudinal se establecieron de manera gráfica; en el punto en que las líneas horizontales tocan los valores predichos por el modelo de regresión, se trazaron líneas perpendiculares para encontrar su valor correspondiente en el eje de las X (altitud en m). Esto es, se encontró la equivalencia de la DMS (11 cm) en valores altitudinales para delimitar cada zona. La equivalencia de la DMS fue de 250 m. Ese valor se simplificó a 200 m, para ajustar la zonificación al rango altitudinal de la especie en la región.

3.3.2.4 Estimaciones de clima contemporáneo y futuro

Se obtuvieron las estimaciones del clima contemporáneo (promedio 1961-1990), así como también predicciones climáticas para el año 2030, de la ubicación geográfica de cada una de las trece poblaciones de *Pinus patula* colectadas. Se utilizaron para ello predicciones del modelo climático canadiense CGCM3 (Coupled Global Climate Model 3) y el escenario de emisiones A2.

Se consideró el escenario de emisiones A2 debido a que los supuestos que proponen son más cercanos a la realidad actual y más probables de suceder en un futuro. El escenario A2 refiere un mundo muy heterogéneo, con incremento continuo de la población global, crecimiento económico orientado regionalmente, crecimiento económico per cápita muy heterogéneo entre países, cambios tecnológicos lentos y fragmentados, y reducción de la fertilidad del suelo para la mayoría de las regiones (IPCC, 2000).

Para obtener las estimaciones del clima contemporáneo y las predicciones de clima para el año 2030 se ingresaron los datos para cada sitio en donde se colectó *P. patula*, de longitud, latitud y altitud en el siguiente vínculo de internet <http://forest.moscowfl.wsu.edu/climate/index.html> (Crookston, 2009), que proporciona estimaciones del clima actual y futuro, útiles para estudiar las relaciones entre la vegetación y su clima y nos permite hacer predicciones del cambio de la distribución de las especies en los paisajes naturales (Rehfeldt, 2006). El modelo climático para México está basado en Sáenz-Romero *et al.* (2009). Las estimaciones se hicieron con base al índice de aridez.

Para obtener el índice de aridez anual se utilizó la siguiente fórmula:

$$IAA = \frac{\sqrt{DD5}}{PA}$$

En donde IAA= índice de aridez anual, DD5 = grados día >5°C (son sumas de temperatura diaria mayores a 5° C a lo largo del año, y PA = precipitación media anual en mm.

Se utilizó el índice de aridez, debido a que es un indicador de la relación entre calor disponible para el crecimiento de plantas (temperaturas diarias mayores a 5° C) y la humedad disponible (precipitación) a lo largo del año. Esta relación en gran medida puede indicar el límite de distribución climática apropiado para un bioma de alguna especie vegetal en particular (Rehfeldt *et al.*, 2006).

Se realizó un análisis de regresión (Proc Reg de SAS) entre el IAA calculado para el clima contemporáneo y para el año 2030 contra la altitud de origen de las procedencias; para determinar la altitud a la cuál ocurrirá un valor similar de IAA en el año 2030 para cada sitio en donde actualmente ocurre una población de *P. patula*, y decidir un posible desplazamiento de las poblaciones.

Se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_{ij}$$

En donde Y_{ij} es la altura promedio esperada de cada población, β_0 es el intercepto, β_1 es el parámetro de regresión, X_i es la altitud origen de la población (m) y e_{ij} es el error.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 Análisis conjunto

En el análisis combinado de los dos sitios (ubicados a 2500 y 3000 m altitudinales) se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre sitios, para las variables altura y diámetro a los 18 y 24 meses y elongación de yema. No se encontraron diferencias significativas entre procedencias para ninguna de las variables evaluadas (altura a los 9, 12, 18 y 24 meses de edad, índice de elongación de yemas y diámetro a los 18 meses de edad) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Porcentaje de contribución a la varianza total (%) y significancia (P) para altura y diámetro a cuatro edades e índice de elongación de yema de las 13 procedencias de *Pinus patula* en campo.

Variable	Sitio		Bloque(Sitio)		Procedencia		Sitio* Proc		Proc *Blo(Sit)		Error
	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	
Altura 9 meses	0.8	0.220	3.9	<.0001	10.0	0.167	23.3	<.0001	0.0	0.604	62.1
Altura 12 meses	4.7	0.074	4.0	<.0001	9.2	0.165	22.4	<.0001	0.0	0.744	59.6
Altura 18 meses	51.1	<.0001	1.6	0.002	2.6	0.191	3.2	0.001	2.7	0.089	38.7
Altura 24 meses	72.1	<.0001	2.5	<.0001	0.7	0.272	1.3	0.012	3.2	0.010	20.1
Diámetro 18 meses	61.0	<.0001	5.8	<.0001	0.0	0.416	0.0	0.757	4.8	0.002	28.4
Diámetro 24 meses	69.2	<.0001	3.9	<.0001	0.0	0.239	0.0	0.825	5.5	<.0001	21.3
Elongación de yema	48.2	<.0001	5.5	<.0001	0.0	0.582	0.0	0.676	1.5	0.065	44.7

El crecimiento promedio en altura y diámetro de las plantas en el sitio ubicado a menor altitud (2,500 m), fue significativamente superior al crecimiento del sitio de mayor elevación (3,000 m) (Figs. 7, 8 y 9). Esto también se expresó mediante un estado fenológico más avanzado de las yemas evaluado a los 16 meses de edad (Fig. 7). Probablemente la presencia de heladas, y en general un clima más frío, retrasó o impidió el desarrollo y el crecimiento en altura del sitio de mayor elevación.

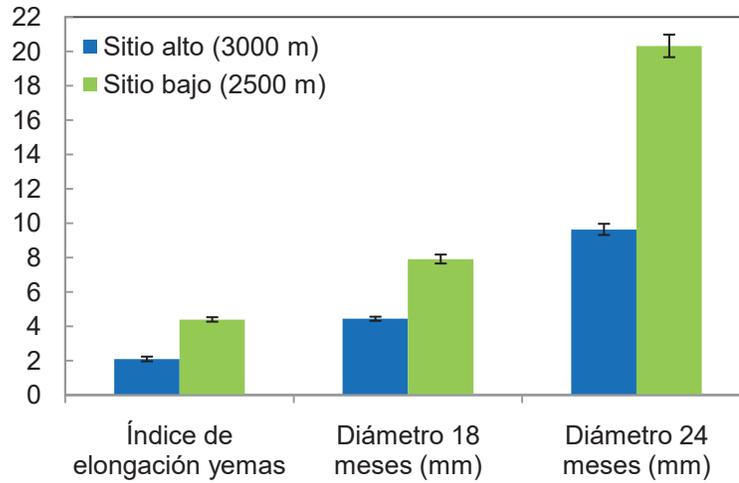


Figura 7. Medias de crecimiento por sitio de las variables índice de elongación de yemas y diámetro basal a los 18 y 24 meses de edad. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza al 95 %.

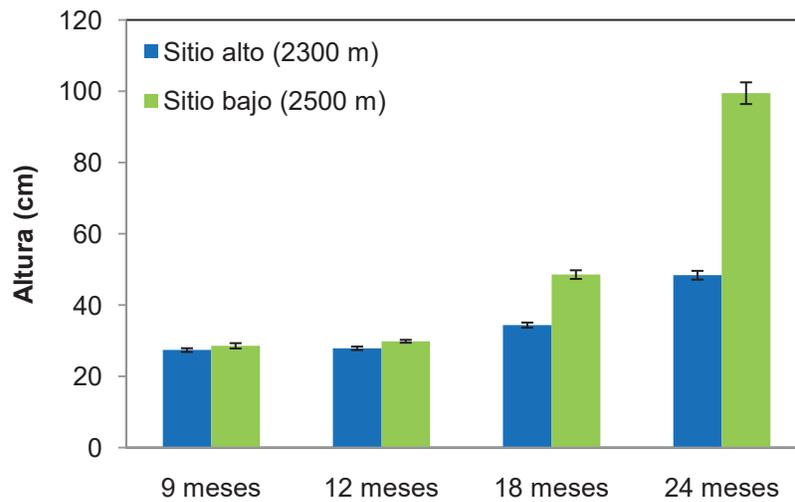


Figura 8. Medias de crecimiento por sitio de la variable altura de planta a los 9, 12, 18 y 24 meses de edad en campo. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza al 95%.

3.4.2 Interacción genotipo x ambiente

La interacción sitio por procedencia, que se puede interpretar como una interacción genotipo por medio ambiente (G x A), fue significativa ($P \leq 0.01$) para altura a todas las edades estudiadas (9, 12, 18 y 24 meses) y no significativa para diámetro, ni para elongación de yema. Las correlación genética tipo B (r_B) de la altura a los 24 meses fue moderada ($r_B = 0.36$). Este valor indica que las procedencias fueron moderadamente estables entre sitios, por lo tanto el desempeño de estos genotipos en diferentes sitios será moderadamente diferente.

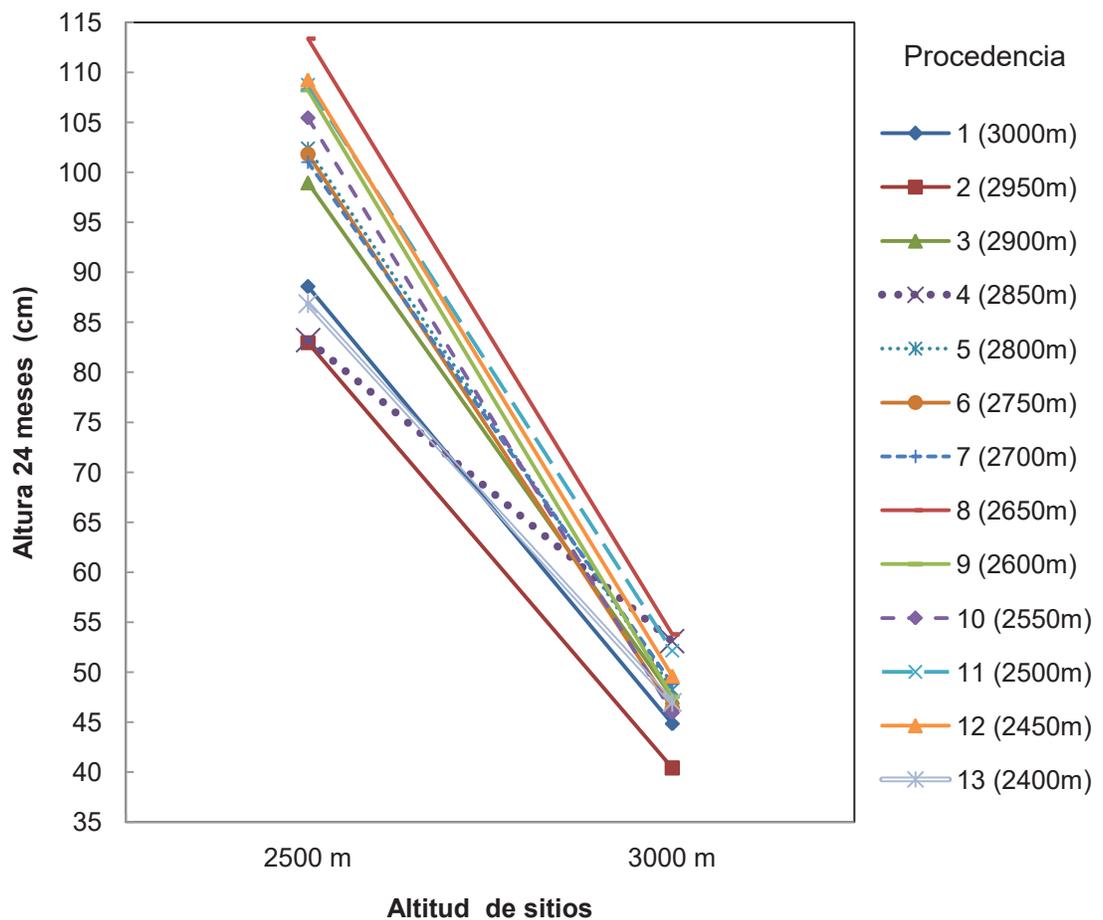


Figura 9. Crecimiento promedio en altura a los 24 meses de edad, de 13 procedencias de *Pinus patula* en dos sitios de altitudes diferentes.

Cuadro 6. Agrupamiento en cuatro grupos de ordenación de procedencias según desempeño promedio de crecimiento en altura de las plantas a los 24 meses de edad en dos sitios, resultados derivados del análisis PROC RANK de SAS, las líneas muestran las procedencias con mayores diferencias entre sitios.

Sitio (2500 m)			Sitio (3000 m)	
Grupo	procedencia	\bar{x}	procedencia	\bar{x}
I	(2650m)	113.4	(2650m)	53.8
	(2450m)	109.3	(2850m)	53.1
	(2500m)	108.8	(2500m)	52.1
II	(2600m)	108.2	(2450m)	49.6
	(2550m)	105.4	(2700m)	48.8
	(2800m)	102.4	(2600m)	47.5
III	(2750m)	101.8	(2800m)	48.2
	(2700m)	101.0	(2900m)	47.5
	(2900m)	99.0	(2400m)	47.0
IV	(3000m)	88.6	(2750m)	46.4
	(2400m)	86.9	(2550m)	45.9
	(2850m)	83.2	(3000m)	44.8
	(2950m)	83.0	(2950m)	40.4

Los promedios por procedencia por sitio presentaron un desempeño similar en ambos sitios. Es decir, las mejores procedencias en un sitio (por ejemplo las originarias de 2,650 y 2,500 m) fueron las mejores en el otro sitio. La excepción a este comportamiento relativamente estable entre sitios fueron las procedencias originarias de 2,550 y 2,850 m altitudinales, que no exhibieron un comportamiento de crecimiento estable entre ambos sitios (Fig. 7 y Cuadro 6). La procedencia de 2,850 m, mostró buena adaptación a las condiciones ambientales del sitio más elevado, por lo que podría ser seleccionada para plantaciones que se realicen en esa altitud, la procedencia de 2,550 m podría ser eliminada como fuente de semilla para el sitio alto, debido a su pobre desempeño tanto en la fase de vivero como en la de

campo, por su baja germinación, baja supervivencia en campo, inestabilidad genotípica, y a que su crecimiento en general fue de medio a bajo.

La procedencia originaria de 2,650 m (originada de una altitud intermedia), manifestó crecimiento superior a las demás poblaciones en todas las mediciones realizadas, tanto en la etapa de vivero como en ambos sitios en campo. Estos resultados fueron consistentes en el análisis realizado por sitios; es decir, su buen desempeño se manifestó en ambos sitios, así como en el análisis combinado y para todas las variables evaluadas. Esto mostró que esta población en particular tiene cierta estabilidad genética (Osorio *et al.*, 2001) y podría seleccionarse como fuente de semilla para posteriores plantaciones en cualquier sitio dentro del rango de distribución natural de la especie en Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

Las procedencias de 2,500 y de 2,450 m también tuvieron un buen desempeño de crecimiento en la fase de campo en ambos sitios; su crecimiento fue ligeramente inferior al de la procedencia de 2,650. Ambas procedencias también podrían ser consideradas como buena procedencias para establecer plantaciones comerciales.

El resto de las procedencias mostraron un comportamiento relativamente estable entre sitios, su posición jerárquica cambió sólo un nivel en el análisis de rangos o se mantuvo constante (Cuadro 6). Con fines de mejoramiento, podría considerarse como opción el seleccionar aquellas procedencias que se desarrollan bien en los dos ambientes, descartando las que presenten mayor interacción.

El índice de elongación de yemas no mostró ningún patrón definido respecto al origen altitudinal de las poblaciones. Sin embargo, es importante notar que el valor promedio del índice fue muy superior en el sitio de la parte baja para todas las procedencias (Figura 10), lo que indica un mayor desarrollo fenológico en el sitio a 2,500 m de altitud. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos para ensayos con otras especies de pino (Gwaze *et al.*, 2001 y Wei *et al.*, 2001), en los

que las plantas expresan mayor crecimiento cuando se establecen sitios con elevaciones menores en donde los periodos de crecimiento son más largos.

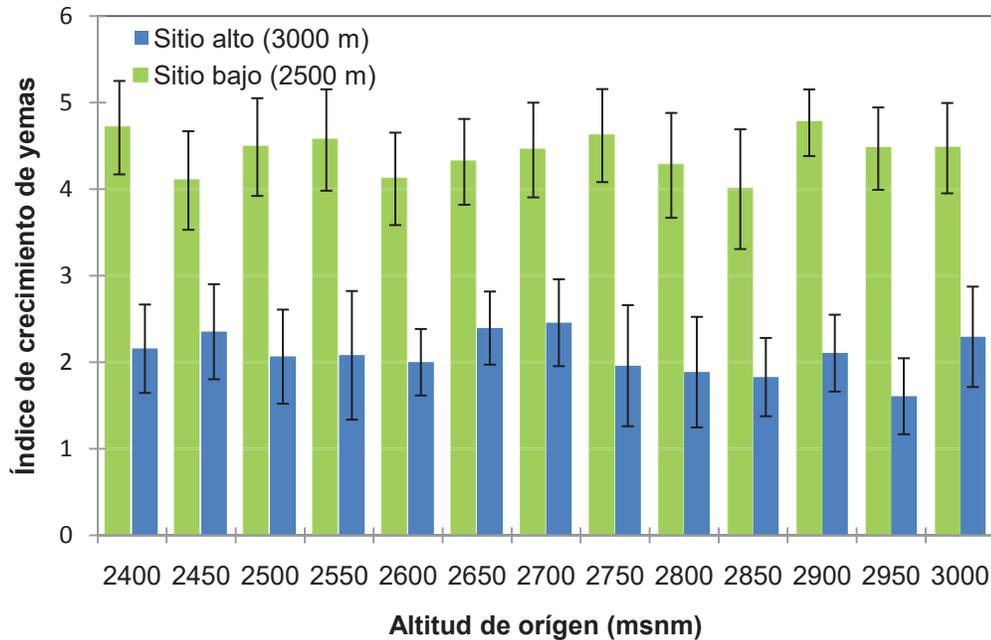


Figura 10. Índice de elongación de yemas promedio de 13 procedencias de *Pinus patula* en dos sitios de plantación con diferente elevación. Las líneas verticales indican los intervalos de confianza al 95%.

El éxito de las plantaciones establecidas fuera de su hábitat natural depende en gran medida del grado de sincronización de la fenología de la yema terminal con el patrón estacional de condiciones climáticas del sitio de plantación. Aunque un inicio más temprano del crecimiento del brote o un retraso en la formación de la yema al término de la temporada de crecimiento podría tener un efecto importante sobre el crecimiento en altura de las plantas, también se aumenta el riesgo de daños por heladas o por otros factores ambientales adversos (Acevedo-Rodríguez *et al.*, 2006).

En la primera evaluación de supervivencia en campo a los 12 meses de edad, hubo mayor supervivencia en el sitio de mayor elevación; probablemente fue así

debido a que desde el momento de la plantación en agosto del 2008, hasta el momento de la medición, a los 12 meses en noviembre de 2008, el suelo del sitio de mayor altitud continuó húmedo mientras que el sitio de menor altitud se mostró más seco. Sin embargo, con la llegada de la época de frío, es muy probable que las plantas hayan sufrido cierto daño por heladas en el sitio de mayor altitud debido a la presencia de heladas más frecuentes, lo que aparentemente se expresó a través de un rápido deceso de las plantas durante este periodo, siendo la supervivencia menor en el sitio alto en las consecutivas mediciones en marzo y mayo del 2008 (Fig. 11). Las diferencias de supervivencia fueron más notables en la evaluación de los 18 meses. En el sitio de menor altitud hubo un micrositio en particular en el que existe una depresión del terreno, en donde muy probablemente se acumuló el aire frío, es en esta zona en donde se descartaron los tres bloques para el análisis de los 18 y 24 meses.

La supervivencia diferente en ambos sitios indicó menor adaptabilidad de los genotipos a las condiciones ambientales del sitio a elevada altitud, posiblemente fue el reflejo de la baja adaptación de los genotipos al clima más frío y mayor frecuencia de heladas (Osorio *et al.*, 2001).

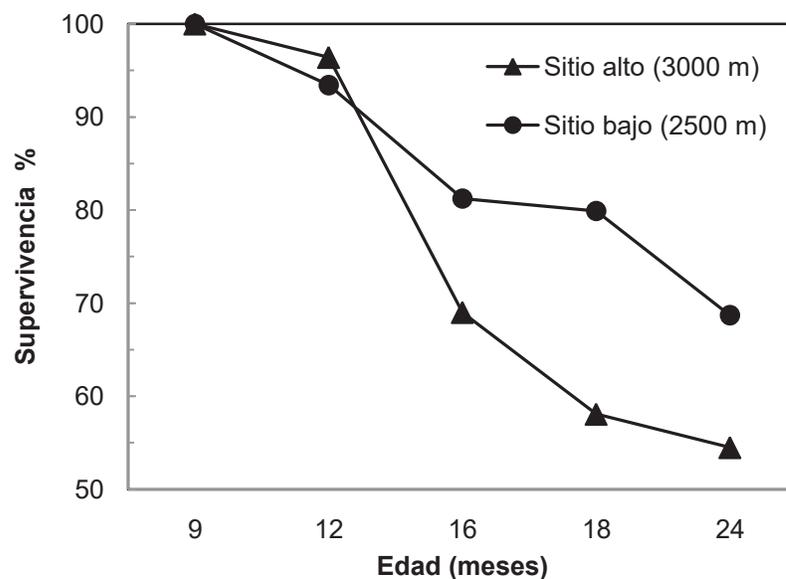


Figura 11. Porcentaje de supervivencia de las plantas a los 9, 12, 16, 18 y 24 meses de edad en dos sitios con diferentes altitud.

3.4.3 Análisis por sitio

Se encontraron diferencias significativas entre procedencias en el análisis por sitio, en crecimiento en altura de planta a los 9, 12, 18 y 24 meses de edad para ambos sitios (Cuadro 7). En contraste, no se observaron diferencias significativas entre procedencias para el índice de elongación de yemas y diámetro a los 18 y 24 meses de edad en ninguno de los sitios. En el sitio de menor altitud hubo interacción estadísticamente significativa entre bloques x procedencia para altura y diámetro a los 18 y 24 meses, y a los 24 meses para diámetro en el sitio de mayor altitud.

Cuadro 7. Porcentaje de contribución a la varianza total (%) y significancia (P) de altura, diámetro e índice de elongación de yemas por sitio, para cuatro edades de las 13 procedencias de *Pinus patula*.

Variable	Procedencia		Bloque		Bloque* Proc		Error %
	%	P	%	P	%	P	
Sitio bajo (2500 m)							
Altura 9 meses	20.8	<.0001	0.9	0.117	0	0.687	78.3
Altura 12 meses	21.7	<.0001	2.1	0.007	0	0.762	76.2
Altura 18 meses	8.6	0.001	4.5	0.008	6.6	0.020	80.4
Altura 24 meses	7.4	0.006	10.7	<.0001	14.4	0.001	67.5
Diámetro 18 meses	0	0.829	18.1	<.0001	14.0	0.001	67.9
Diámetro 24 meses	0	0.641	15.8	<.0001	20.1	<.0001	64.1
Elongación de yema	0	0.709	14.4	<.0001	2.5	0.112	83.1
Sitio alto (3000 m)							
Altura 9 meses	41.3	<.0001	5.7	<.0001	0	0.462	53.1
Altura 12 meses	40.6	<.0001	5.6	<.0001	0	0.584	53.8
Altura 18 meses	23.8	<.0001	1.2	0.321	5.3	0.283	69.7
Altura 24 meses	6.5	0.002	6.6	0.0003	0	0.713	86.9
Diámetro 18 meses	3.3	0.093	9.7	<.0001	3.8	0.350	83.2
Diámetro 24 meses	0	0.884	7.7	0.001	15.0	0.013	77.3
Elongación de yema	0	0.679	5.3	0.011	3.6	0.146	91.1

Hubo continuidad en la tendencia del crecimiento en altura de la planta que se observó en vivero (Capítulo 2), que se expresó mediante mayor crecimiento de las poblaciones originarias de la parte intermedia del rango de distribución de la especie en la zona, y para el caso del ensayo de la parte baja (2,500 m), también las poblaciones de baja altitud (excepto la de la más baja altitud, 2,400 m) presentaron buen crecimiento. En general, las poblaciones originarias de los extremos altitudinales (superior e inferior) en ambos sitios presentaron menor crecimiento (Figs. 12 y 13).

Las procedencias originarias de sitios más altos presentaron crecimiento moderadamente menor en altura que el resto de las poblaciones. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Salazar-García *et al.* (1999); en una evaluación de once procedencias de *P. patula* de una plantación, mostraron que en esta especie, la tasa de crecimiento en altura y el número de ciclos de crecimiento se asociaron negativamente con la altitud de origen de la población.

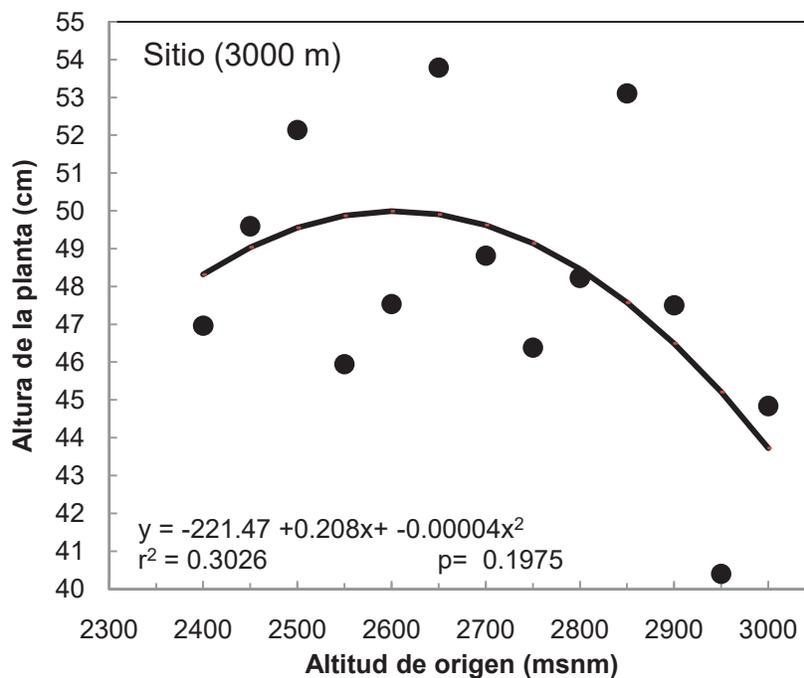


Figura 12. Comparación de medias de crecimiento a los 24 meses de edad en altura de planta para cada procedencia creciendo en el sitio alto (3000 m) respecto a su altitud de origen.

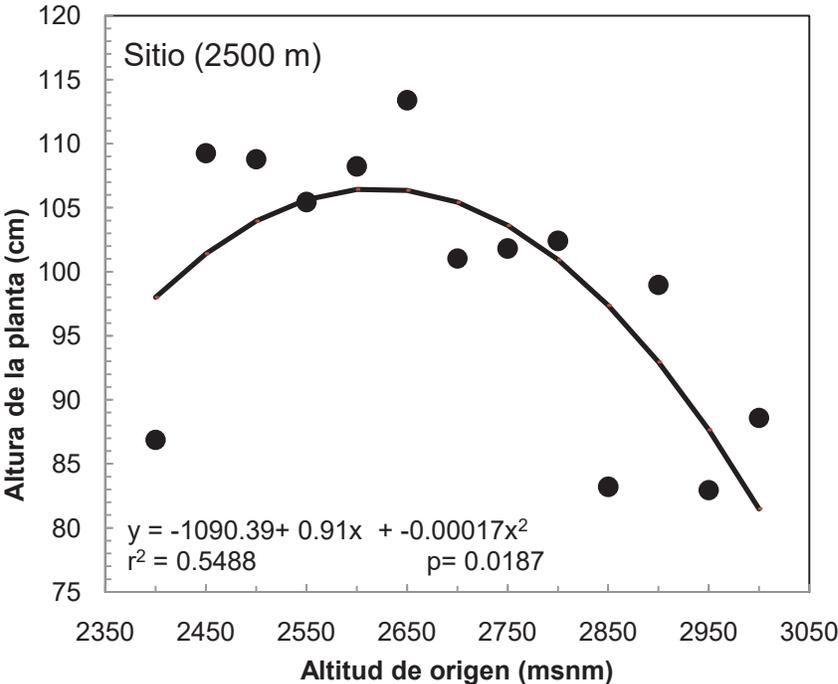


Figura 13. Comparación de medias de crecimiento a los 24 meses de edad en altura de planta para cada procedencia en el sitio bajo (2500 m) y su altitud de origen.

Para el sitio de menor altitud, la regresión entre altura de la planta a los 24 meses de edad por procedencia y la altitud de origen fue ($r^2 = 0.5488$ $p=0.0187$). Esto significa que hay una asociación significativa entre la altitud de origen de las poblaciones y el crecimiento en altura, en donde las poblaciones de los extremos del rango altitudinal crecen menos que las de la parte media (Fig. 13).

3.4.4 Correlación entre edades

Se encontró que el coeficiente de correlación entre crecimiento en altura de planta promedio por procedencia a los 6 meses, en la etapa de vivero y a los 24 meses en campo en el sitio bajo, fue $r = 0.606$. Es decir, hubo asociación estadísticamente significativa entre ambas edades (Fig. 14).

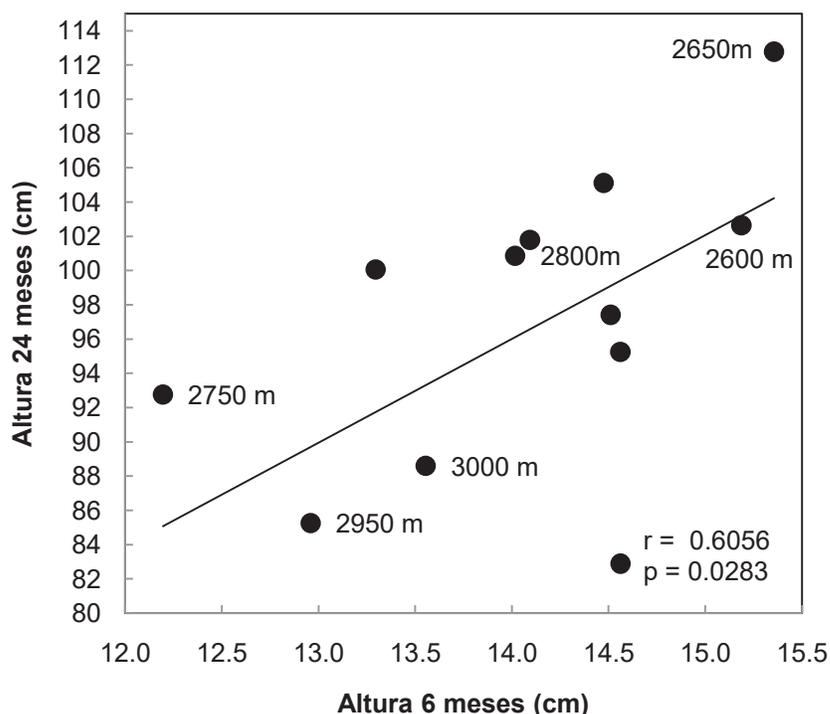


Figura 14. Comparación de medias por procedencia de crecimiento en altura de la planta a los 6 meses en etapa de vivero y a los 24 meses en etapa de campo, en el sitio de menor altitud. Se indica la altitud de origen de algunas procedencias.

En la comparación de crecimiento entre dos edades de campo en el sitio bajo, de 12 y 24 meses, hubo un coeficiente de correlación altamente significativo: $r = 0.708$ ($p = 0.005$), (Fig. 15). Aparentemente, tal relación indica la posibilidad de seleccionar las plantas a edades tempranas del desarrollo y usarse como indicador para predecir el comportamiento futuro y/o para realizar selección temprana de las

mejores procedencias. Esto contribuiría a reducir el tiempo y el costo de los programas de mejoramiento (Adams et al., 2001). No obstante deben considerarse que estos resultados no proporcionan evidencia de la relación que guardan los caracteres evaluados con la producción de madera a la edad de la cosecha (Sánchez- Vargas et al., 2008).

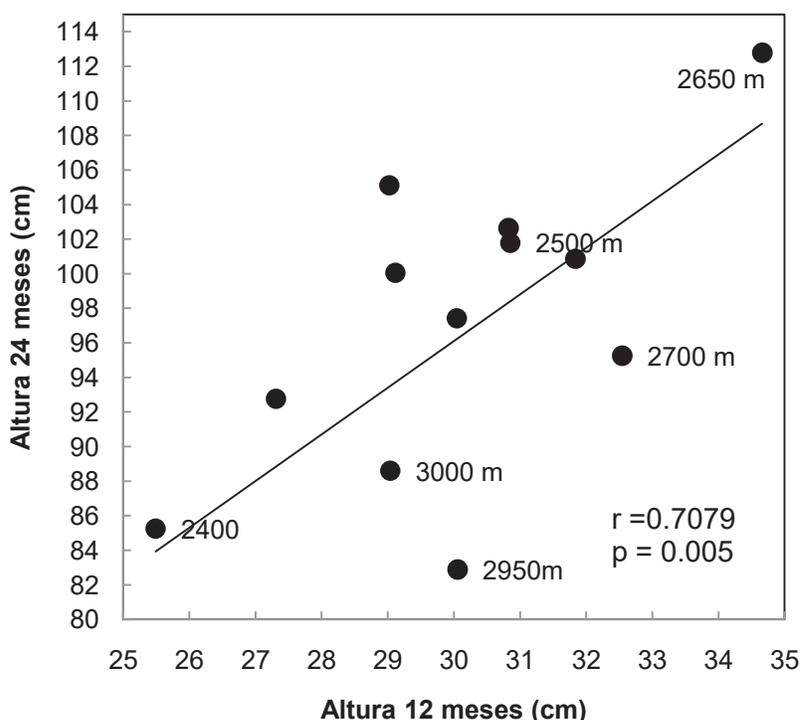


Figura 15. Comparación de medias por procedencia de crecimiento en altura de la planta a los 12 meses en etapa de vivero y a los 24 meses en etapa de campo, en el sitio de menor altitud. Se indica la altitud de origen de algunas procedencias.

3.4.5 Zonificación altitudinal

Para la construcción de una zonificación altitudinal que permitiera decidir el manejo adecuado de semillas de *P. patula* de la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, se utilizaron como modelo los datos de altura de planta a los 24 meses de edad del sitio de menor altitud, ya que en éste se presentaron diferencias altitudinales

significativas entre procedencias para el crecimiento en altura y dichas diferencias siguieron un patrón altitudinal de crecimiento bien definido y estadísticamente significativo.

El valor de la Diferencia mínima significativa (DMS $\alpha = 0.2$) entre procedencias para altura de planta fue de 11 cm

Para considerar la amplitud total de la distribución de la especie en la zona y facilitar el uso de la zonificación, se ajustaron los límites altitudinales a 200 m de amplitud. Con el procedimiento anterior, en el presente trabajo se delimitaron tres zonas, cada una de 200 m altitudinales de amplitud, que quedaron como sigue: zona 1 de 2400 a 2600 m, Zona 2 de 2600 a 2800 m, y zona 3 de 2800 a 3000 m (Cuadro 8 y figura 16). Como consecuencia de la división práctica en zonas semilleras altitudinales se obtuvieron los límites indicados en el cuadro 8.

Cuadro 8. Límites altitudinales de las tres zonas semilleras de *P. patula* establecidos para la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

Zona	Limite altitudinal (m)		Rango (m)
	Inferior	Superior	
1	2400	2600	200
2	2600	2800	200
3	2800	3000	200

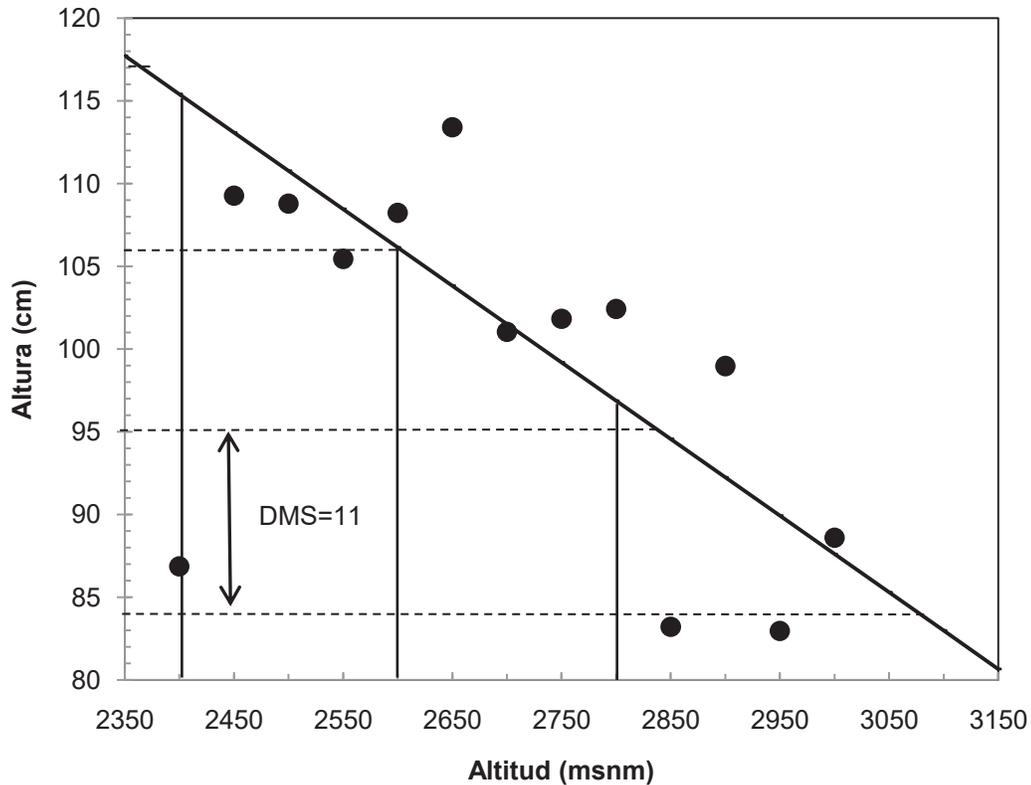


Figura 16. Límites y rangos altitudinales para tres zonas semilleras de *P. patula* en la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. La flecha y las líneas horizontales revelan la distancia de Diferencia Mínima Significativa (DMS) =11, a partir de 117 m, en el eje Y. Las líneas verticales indican los límites de cada zona de acuerdo a las DMS, y las líneas horizontales indican los límites altitudinales superior e inferior de las zonas que se determinaron en este trabajo para fines prácticos.

3.4.6 Alternativas de manejo. Usos de la zonificación altitudinal.

3.4.6.1 Restauración ecológica

El objetivo principal de un programa de restauración es restablecer la zona alterada con elementos originales. Partiendo del supuesto de que la fuente de semilla local se encuentra bien adaptada a las condiciones ambientales locales (Campbell, 1986), para fines de restauración ecológica, la semilla colectada en una zona semillera se debe utilizar dentro de la zona en que se colectó, y/o en un intervalo

altitudinal a partir del sitio en donde se colectó de ± 100 m a partir del sitio, que corresponde a la mitad de la anchura del intervalo altitudinal de cada zona semillera. Sin embargo, esta recomendación se hace ignorando los efectos del cambio climático.

3.4.6.2 Conservación de recursos genéticos.

El conjunto de las zonas delimitadas capturan una muestra representativa de cómo está estructurada la diversidad genética de *P. patula* de la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca y puede ser utilizada para establecer dentro de cada una de esas zonas una UCRGF (Unidad de Conservación de Recursos Genéticos Forestales). Una UCRGF es un área natural con poblaciones o comunidades representativas de alguna especie, cuya función principal es la protección *in situ* de los recursos genéticos de dicha especie (Ledig, 1988). Las UCRGF pueden servir como una estrategia para proteger al menos una parte de la diversidad genética de alguna especie con prioridad para la conservación, así como permitir a las fuerzas evolutivas naturales moldear la estructura genética de la población. La regeneración de las UCRGF puede lograrse mediante la regeneración natural o la artificial, si seguimos una regla sencilla: replantar con la fuente de semilla de la propia UCRGF (Sáenz-Romero *et al.*, 2003).

3.4.6.3 Mejoramiento genético

Si se pretende realizar mejoramiento genético para producción de madera, sería recomendable seleccionar las procedencias que mostraron mejor desempeño en ambos sitios (Codesido y Fernández López 2009). La procedencia originaria de 2650 m, podría considerarse como fuente principal de semilla, debido a su mejor desempeño respecto a las demás, así como también las procedencias 11 y 12 originarias de 2500 m y 2450 m de altitud respectivamente. Es muy probable que estas tres procedencias puedan desarrollarse exitosamente en cualquier lugar que se establezcan dentro de la zona de distribución altitudinal en la región de Ixtlán de

Juárez, como sugieren hasta ahora los resultados de los ensayos de campo realizados a altitudes contrastantes.

3.4.6.4 Adaptación a los efectos del cambio climático.

Desde otra perspectiva, sería más razonable desplazar la semilla altitudinalmente hacia arriba solamente, con el fin de prevenir los efectos negativos de una baja adaptación de las poblaciones a un futuro escenario de calentamiento global, más cálido y más seco. Esto coincide con un estudio realizado con diferentes especies vegetales, comparando la distribución de dichas especies a lo largo del siglo anterior (Lenoir *et al.*, 2008), en donde se muestra que el cambio climático está causando el desplazamiento altitudinal hacia arriba de los rangos de distribución de las poblaciones, particularmente de aquellas especies que se distribuyen en hábitats montañosos, y propone una hipótesis según la cual la distribución de las plantas se está desplazando o restringiendo a las partes más altas, como un medio para escapar al incremento de las temperaturas causadas por el cambio climático.

Según las estimaciones hechas con el escenario A2 del modelo canadiense CGM3 (Canadian General Model), para el año 2030 las poblaciones de *P. patula* deberá moverse altitudinalmente hacia arriba entre 150 y 250 metros, para establecerse en sitios con condiciones climáticas similares a las que se encuentran ubicadas actualmente, considerando el valor de IAA como un indicador del clima (Fig. 17). Los procesos evolutivos para llevar a cabo dichos ajustes, tales como la migración natural, requieren de periodos de tiempo mayores que los que son posibles esperar, dada la velocidad a la que ocurre el cambio climático. Por ello es necesaria la intervención de los mejoradores forestales para participar en el proceso de adaptación y asegurar que las especies apropiadas y sus genotipos alcancen su clima óptimo en un tiempo adecuado. Esta participación tomaría la forma de programas de plantaciones masivas de transferencia de semilla de los lugares en donde se localizan actualmente a sitios en donde ocurrirá su clima óptimo futuro (Tchebankova *et al.*, 2005). El desplazamiento altitudinal hacia arriba también

propiciaría mayor crecimiento, ya que con frecuencia se ha observado que las fuentes de semilla de climas más cálidos, tienden a crecer más que las fuentes de semilla locales, mientras no se establezcan en climas muy diferentes (Schmidtling, 2004; Wei *et al.*, 2001). Sin embargo, un desplazamiento altitudinal hacia arriba excesivo, podría implicar un riesgo de daño por heladas (Sáenz-Romero y Tapia-Olivares, 2008). Por lo anterior, como regla general, se sugiere desplazar altitudinalmente hacia arriba 200 m a partir del sitio de colecta.

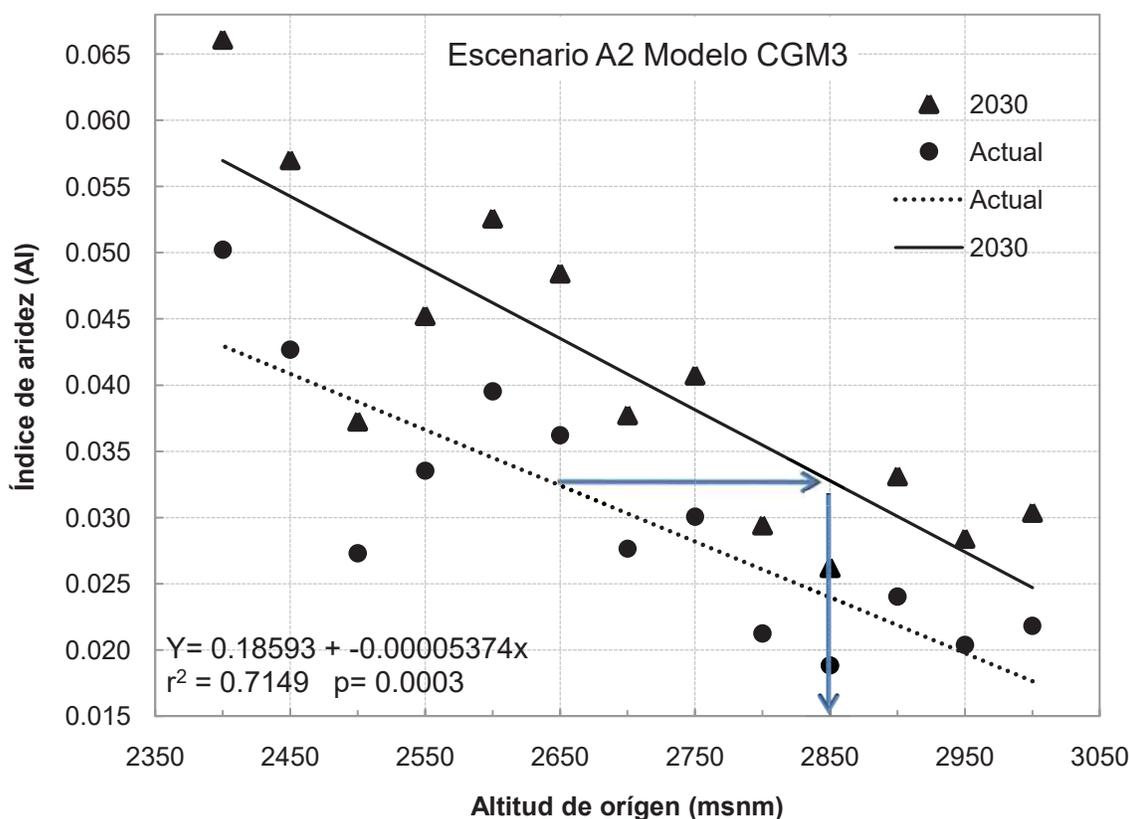


Figura 17. Estimación del índice de aridez anual (IAA) actual (●) y futuro (año 2030) (▲) de 13 procedencias. Las flechas indican la altitud a la que ocurrirá el índice de aridez actual en el año 2030 de la población originaria de 2,650 m de altitud.

3.5 CONCLUSIONES

Existe diferenciación genética entre procedencias, para la variable altura de planta a los 9, 12, 18 y 24 meses de edad, cuando el análisis se hizo por sitio. No se encontró diferenciación significativa entre poblaciones para diámetro basal; así como tampoco para el estado fenológico de las yemas.

La mayoría de las poblaciones se desempeñaron mejor en el sitio de menor elevación, con un crecimiento que duplica al del sitio a elevada altitud.

La diferenciación entre poblaciones siguió un patrón altitudinal definido y estadísticamente significativo para altura de planta, según el cual las procedencias originadas en altitudes intermedias presentaron crecimiento superior a las originadas en los extremos altitudinales.

La procedencia originaria de 2,650 m fue superior en crecimiento en las etapas de vivero y campo en ambos sitios, y podría ser seleccionada preliminarmente como fuente de semilla. Además, tuvo alto porcentaje de supervivencia y aparente estabilidad genética (buen desempeño en ambos sitios). Las procedencias originarias de 2,500 y 2,450 m altitudinales también mostraron buen desempeño, ligeramente inferior al de la procedencia originaria de 2,650 m.

Hubo correlación significativa y relativamente alta entre el crecimiento en la fase de vivero y campo en altura de planta, entre las edades de 6 meses en vivero y 24 meses en campo, así como entre edades en el crecimiento en campo a 12 y 24 meses de edad.

Los resultados del presente estudio sugieren que la interacción genotipo por ambiente ($G \times A$), si bien es estadísticamente significativa, aparentemente es producto del desempeño de unas pocas procedencias que tuvieron un desempeño muy distinto en ambos sitios (originarias de 2,550 y 2,850 m altitudinales). Esas procedencias no se recomiendan como fuentes de semilla para todos los sitios de

reforestación. El resto de las poblaciones parecen desempeñarse con bastante estabilidad en los ambientes ensayados.

En base a los óptimos resultados obtenidos en el sitio de menor elevación, se puede proponer una zonificación altitudinal, para decidir el manejo de semilla y plantas de *P. patula* para fines de reforestación en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, consistente en tres zonas altitudinales: Zona 1, de 2,400 a 2,600 m de altitud; Zona 2, de 2,600 a 2,800 m, y Zona 3, de 2,800 a 3,000. Esto proporciona una herramienta para apoyar en las decisiones sobre transferencia de fuentes de semilla dentro y entre zonas productoras para acoplar los genotipos a los ambientes adecuados.

Los resultados obtenidos poseen aplicaciones prácticas para el manejo de recursos naturales, se propusieron alternativas de manejo para los siguientes fines: restauración ecológica, conservación de recursos genéticos (usar semilla de la misma zona), mejoramiento genético (usar semilla de la zona más productiva) y adaptación al cambio climático (mover altitudinalmente hacia arriba el máximo del intervalo de la zona, a partir del sitio de colecta).

3.6 LITERATURA CITADA

- Adams, W. T., Aitken S. N., Joyce D. G., Howe G. T. and Vargas-Hernández J. 2001. Evaluating efficacy of early testing for stem growth in coastal Douglas-fir. *Silvae Genetica* 50:167-175
- Acevedo-Rodríguez, R., Vargas-Hernández J., López-Upton J. y Velázquez-Mendoza J. 2006. Efecto de la procedencia geográfica y de la fertilización en la fenología del brote terminal en plántulas de *Pseudotsuga* sp. *Agrociencia* 40: 125-137.
- Campbell, R. K. 1979. Geneecology of Douglas-fir in a watershed in the Oregon Cascades. *Ecology* 60(5):1036-1050.
- Campbell, R. K. 1986. Mapped genetic variation of Douglas-fir to guide seed transfer in Southwest Oregon. *Silvae Genetica* 35:85-96.
- Codesido, V. and Fernández-López J. 2009. Implication of genotype x site interactions on *Pinus radiata* breeding in Galicia. *New Forest* 37:17-34.
- Conkle, T. M. 2004. Zonificación de semillas en México. En: Vargas-Hernández J. J., Bermejo Velázquez B. y F. Thomas Ledig. (Eds.) Manejo de recursos genéticos forestales. SEMARNAT, CONAFOR, 73-87.
- Crookston, N. 2009. Custom climate data request. USDA Forest Service - Moscow Forestry Sciences Laboratory, Rocky Mountain Research Station <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/customData> (accedida enero 2010).
- Dvorak, W. S., Hodge G. R., Kietza J. E., Malan F., Osorio L. F. and Stranger T. K. 2000. *Pinus patula*. En: CAMCORE (Ed.) Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the Camcore Cooperative Department of Forestry, North Carolina State University. 243 pp 148- 173.

- Gwaze, D. P., Williams J. A., Kanowski P. J. and Bridgwater F. E. 2001. Interactions of genotype with site for height and stem straightness in *Pinus taeda* in Zimbabwe. *Silvae Genetica* 50 (3-4) 135-140.
- Gómez-Mendoza, L. and Arriaga L. 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology* 21 (6): 1545-1555.
- Huehn, M., Kleinschmit J. and Svolva J. 1986. Experimental results concerning age dependency of different components of variance in testing Norway Spruce (*Picea abies* ((L) Karst.) clones. *Silvae Genetica*. 36:2 68-71.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2000. Emissions Scenarios; Summary for Policymakers. Special Report of IPCC Working Group III. USA, IPCC, 21 p. (<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>).
- Johnson, G. R. 1997. Site-to-site genetic correlations and their implications on breeding zone size and optimum number of progeny test sites for coastal douglas fir. *Silvae Genetica* 46:(5) 280-285.
- Lambeth, C. C., Van Buijtenen J. P., Duke S. D. and McCullough R. B. 1983. Early selection is effective in 20-year-old genetic tests of loblolly pine. *Silvae Genetica*, 32, (5-6): 210-215.
- Ledig, T. F. 1988. The conservation of diversity in forest trees. *BioScience* 38(7): 471-479
- Ledig, T. F. 2004. Conservación y manejo de recursos genéticos forestales. En: Vargas-Hernández J. J., Bermejo-Velázquez B. y Ledig. T. (Eds.) Manejo de recursos genéticos forestales. SEMARNAT, CONAFOR, 73-87.
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., de Ruffray P. and Brisse H. 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th Century. *Science* 320, 1768 –1770.

- Osorio, L. F., White T. L. and Huber D. A. 2001. Age trends of heritabilities and genotype-by-environment interactions for growth traits and wood density from clonal trials of *Eucalyptus grandis* HILL ex MAIDEN. *Silvae Genetica* 50 (3-4): 108-117.
- Pswarayi, I. Z., Barnes R. D., Birks J. S. and Kanowski P. J. 1997. Genotype-environment interaction in a population of *Pinus elliottii* Engelm. var *elliottii*. *Silvae Genetica* 47 (5-6):35-40.
- Rehfeldt, G. E. 1988. Ecological genetics of *Pinus contorta* from the Rocky Mountains USA, a synthesis. *Silvae Genetica* 37(3-4): 131-135.
- Rehfeldt, G. E. 2006. A spline model of climate for the Western United States. Gen. Tech. Rep. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 21p.
- Rehfeldt, G. E., Tchebakova N. M., Parfenova Y. I., Wykoff W. R., Kusmina N.A. and Milyutin L. I. 2002. Intraespecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology* 8: 912-929.
- Sáenz-Romero, C. 2004-a. Zonificación estatal y altitudinal para la colecta y movimiento de semillas de coníferas en México. En: Vargas-Hernández J. J., Bermejo-Velázquez B. y F. Ledig T. F. (Eds.) Manejo de recursos genéticos forestales. SEMARNAT, CONAFOR, 73-87.
- Sáenz-Romero, C. 2004-b. Zonificación y conservación de coníferas en México. En: Vera C. G., Vargas H. J. y Dorantes L. J. (Eds.) Uso y conservación de recursos genéticos forestales. CONAFOR, 15-19.
- Sáenz-Romero, C. y Lindig-Cisneros, R. 2004. Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita* 37:107-122.
- Sáenz-Romero, C., Snively A. E. y Lindig-Cisneros R. 2003. Conservation and restoration of pine forest genetic resources in Mexico. *Silvae Genetica* 52 (5-6) 233-237.

- Sáenz-Romero, C. y Tapia-Olivares B. L. 2008. Genetic variation in frost damage and seed zone delineation within an altitudinal transect of *Pinus devoniana* (*Pinus michoacana*) in Mexico. *Silvae Genetica* 57(3) 165-170.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt G. E., Crookston N. L., Duval P., St-Amant R., Beaulieu J. and Richardson B. A. 2009. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic change*.
- Salazar-García, J., Vargas-Hernández J., Jasso-Mata J., Molina-Galán J., Ramírez-Herrera C. y López-Upton J. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5(2): 19-34.
- Sánchez-Vargas, N., Cambrón Sandoval V. H., Sáenz-Romero C. y Vargas Hernández J. J. 2008. Parámetros genéticos del crecimiento temprano de familias de medios hermanos de *Pinus pseudostrobus* Lindl en Michoacán México. *Revista Forestal Venezolana* En prensa.
- Sánchez-Vargas, N., Vargas-Hernández J., Ruiz-Posadas L. y López-Upton J. 2004. Repetibilidad de parámetros genéticos en un ensayo clonal de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en el sureste de México. *Agrociencia* 38: 465-475.
- SAS Institute Inc (1999) SAS/STAT Computer Software. Release 8. SAS Institute Inc, Cary, North Carolina, 3rd Edition.
- Schmidtling, R. C., 2004. Lineamientos para la transferencia de semilla en los pinos del sur (grupo Australes) de Estados Unidos. En: Vera C. G., Vargas H. J. y Dorantes L. J. (Eds.) *Uso y conservación de recursos genéticos forestales*. CONAFOR, 91 pp 15-19.
- Tchebakova, N. M., Rehfeldt G. E., and Parfenova E. I. 2005. Impacts of climate change on the distribution of *Larix* spp. and *Pinus sylvestris* and their climatotypes in Siberia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11(4): 861-882.

- Van Zonneveld, M., Jarvis A., Dvorak W., Lema G. and Leibnig C. 2009. Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. *Forest Ecology and Management* 257(7): 1566-1576
- Velázquez-Martínez, A., Ángeles-Pérez G., Llanderal-Ocampo T., Román Jiménez A. R. y Hernández Reyes V. 2004. Monografía de *Pinus patula*. 1ª ed. CONAFOR 124 pp.
- Viveros-Viveros, H., Saenz-Romero C., López Upton J. y Vargas Hernández J. 2005. Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrabus* Lindl. en campo. *Agrociencia* 39: 575-587.
- Wei, R. P., Lindgren K. and Lindgren D. 2001. Parental environment effects on cold acclimation and height growth in Lodgepole pine seedlings. *Silvae Genetica* 50 (5-6): 252-257.
- Xie, C. Y. and Ying C. C. 1996. Heritabilities, age-age correlations and early selection in lodgepole pine (*Pinus contorta* ssp. *Latifolia*) *Silvae Genetica* 45(2- 3): 101-106.

4. DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados obtenidos en la etapa de vivero pueden considerarse indicadores del posterior desempeño de las plantas en campo. Esto se comprueba con la significancia de las correlaciones vivero-campo. Hubo correlación entre las edades de 6 meses en vivero y 24 meses en campo, así como en el crecimiento en campo a las edades de 12 y 24 meses. Esto indica que de hacerse selección temprana, se podría optimizar en tiempo y dinero, acelerando la selección de las mejores procedencias y haciendo posibles ensayos de campo más pequeños considerando sólo las procedencias preseleccionadas.

Pinus patula es una especie que muestra diferenciación genética a lo largo de gradientes altitudinales, en la región de Ixtlán de Juárez Oaxaca. A través de todas las evaluaciones realizadas, se encontraron diferencias significativas entre procedencias para la variable altura en las diferentes edades de la planta, desde los 3 meses de edad en vivero hasta los 24 meses en campo, cuando los análisis se realizaron para cada sitio. La diferenciación entre poblaciones sigue un patrón variación para altura de planta en las diferentes edades evaluadas; en el que las procedencias originarias de altitudes intermedias presentan crecimiento en general superior a las originadas en los extremos altitudinales. Esta depresión en el crecimiento de las procedencias de los extremos es más notable en las procedencias originarias de las elevaciones mayores, principalmente cuando se ensayaron en el sitio de menor elevación (2,500 m) en campo. En dicho ensayo, de entre las procedencias de la parte baja, solamente la procedencia originaria de la menor altitud tiene pobre desempeño, mientras que varias procedencias originarias de la parte baja tienen un desempeño bueno, comparable con las de origen altitudinal intermedio.

La procedencia originaria de 2,650 m de altitud podría ser seleccionada preliminarmente como la mejor fuente de semilla, para establecer plantaciones

comerciales con esta especie en la región de Ixtlán de Juárez. Esta procedencia tiene crecimiento superior a las demás para mayoría de las variables evaluadas, tanto en la etapa de vivero como en campo, y tiene alto porcentaje de supervivencia, además de que su comportamiento es similar en los dos sitios ensayados en campo.

La procedencia originaria de 2,450 m de altitud muestra también un buen desempeño en ambos sitios en campo y en vivero, ligeramente inferior al de la procedencia originaria de 2,650 m.