



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y FORESTALES  
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS



---

**MIGRACION ASISTIDA DE PROCEDENCIAS DE *Pinus pseudostrobus*,  
*P. devoniana* y *P. leiophylla* EN NUEVO SAN JUAN PARANGARICUTIRO,  
MICHOACÁN**

**TESIS**

Que presenta

**DANTE CASTELLANOS ACUÑA**

Como requisito para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**Director de tesis:** Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero

**Codirector de tesis:** Dr. Roberto Lindig Cisneros

Morelia, Michoacán. Abril del 2013.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN GENERAL .....   | 2  |
| INTRODUCCIÓN y ANTECEDENTES .....   | 4  |
| Diferenciación genética entre poblaciones.....  | 4  |
| Efectos potenciales del cambio climático.....   | 5  |
| Los bosques de la Comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro .....   | 7  |
| Migración asistida .....  | 8  |
| Descripción de las especies.....  | 10 |
| <i>Pinus leiophylla</i> .....   | 10 |
| <i>Pinus devoniana</i> .....  | 11 |
| <i>Pinus pseudostrobus</i> .....  | 12 |
| Objetivo General.....   | 14 |
| Objetivos Particulares .....  | 14 |
| REFERENCIAS .....   | 15 |
|   |    |
| VARIACIÓN ALTITUDINAL ENTRE ESPECIES Y PROCEDENCIAS DE <i>Pinus</i><br><i>pseudostrobus</i> , <i>P. devoniana</i> y <i>P. leiophylla</i> . ENSAYO DE VIVERO.....                      | 18 |
| RESUMEN.....  | 18 |
| INTRODUCCION .....  | 18 |
| METODOLOGIA .....   | 20 |
| RESULTADOS y DISCUSION .....  | 23 |
| Diferencias entre especies .....  | 23 |
| Diferencias entre procedencias y patrón altitudinal .....   | 24 |
| Implicaciones para manejo, y ante escenarios de cambio climático .....  | 28 |
| CONCLUSIONES .....  | 30 |
| REFERENCIAS .....   | 30 |
|   |    |
| Migración asistida altitudinal de poblaciones de <i>Pinus devoniana</i> , <i>P. leiophylla</i> y <i>P.</i><br><i>pseudostrobus</i> en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán ..... | 35 |
| RESUMEN.....  | 35 |
| INTRODUCCIÓN .....  | 36 |
| METODOLOGIA .....   | 38 |
| RESULTADOS.....   | 43 |
| Sobrevivencia.....  | 43 |
| Altura de planta, crecimiento y peso seco: análisis general .....   | 43 |
| Altura de planta, crecimiento y peso seco: análisis por especie.....  | 45 |
| Respuesta general en crecimiento ante el movimiento altitudinal experimental.....   | 49 |
| Implicaciones para manejo.....  | 51 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 54 |
| REFERENCIAS .....   | 55 |
|   |    |
| DISCUSION GENERAL .....   | 58 |
| REFERENCIAS .....   | 60 |

## RESUMEN GENERAL

México posee recursos genéticos forestales aun sin ser investigados. El nivel de variación entre poblaciones forestales generalmente es el de mayor contribución a las características de importancia adaptativa, por lo que es necesario caracterizar los patrones de variación genética entre poblaciones. Las diferencias entre poblaciones significan que cada población está adaptada a una porción de las diferentes condiciones ambientales ocupadas por la especie, con lo cual la especie tiene la capacidad de adaptarse y responder a ambientes heterogéneos. Las condiciones ambientales que moldean la variación genética, y por tanto controlan la adaptabilidad, no son estáticas. Por ejemplo, para México, para la década de 2090 se proyecta un aumento en temperatura de 3.7° C, y una disminución en precipitación del 18.2%. Con un clima más caliente en el futuro, las especies enfrentaran diferentes escenarios, tales como la necesidad de migración en latitud hacia los polos, o en altitud hacia partes más altas, o en el peor de los casos, la extinción. Para asegurar la adaptación de las poblaciones forestales en el futuro, es necesario anticiparse y realinear los genotipos a los ambientes que ocurrirán en el futuro, práctica conocida como migración asistida. Esto en general se puede lograr colectando semilla, produciendo planta en vivero y reforestando en un sitio en donde ocurrirá en el futuro el clima para el cual está adaptada la población de la que se colectó la semilla. Sin embargo, dicha práctica conlleva el riesgo de causar una severa desadaptación a las poblaciones, por lo que se ha incrementado el interés en conocer cómo se modifican las respuestas en crecimiento y producción de poblaciones de especies forestales ante los cambios ambientales. Por lo anterior, en el presente trabajo se colectaron diferentes procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* (= *P. michoacana*) y *P. leiophylla*, a lo largo de un gradiente altitudinal (1650m a 2500m), y se establecieron en ensayos de especies-procedencias a diferentes altitudes (2100 m, 2400 m y 2700 m de altitud, en los bosques de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán). Lo anterior se realizó con el objetivo de evaluar su desempeño a las diferentes condiciones ambientales, y de esta manera establecer lineamientos que permitan migrar las poblaciones altitudinalmente, con el fin de prevenir los efectos negativos de una baja adaptación a un futuro escenario de calentamiento global. En general, se tuvieron muy buenos resultados en

cuanto a sobrevivencia para las tres especies en los tres sitios de ensayo: *Pinus pseudostrobus* tuvo un 99.7% de sobrevivencia, mientras que *P. devoniana* y *P. leiophylla* un 98%. El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre sitios para todas las variables de crecimiento. Sólo para *Pinus devoniana* se encontraron diferencias significativas entre poblaciones en crecimiento. No se encontraron diferencias significativas entre poblaciones de *P. leiophylla* ni de *P. pseudostrobus*. De manera general, la respuesta en crecimiento al movimiento altitudinal experimental se adecúa al de un modelo de regresión cuadrática, en donde el crecimiento disminuye conforme las poblaciones se alejan del lugar donde se originan. Por cada 100 m de movimiento altitudinal hacia arriba, a partir del sitio de origen, ocurre una disminución del 5% del crecimiento, en comparación a si la población estuviera creciendo en su sitios de origen. Se recomienda considerar la migración asistida de poblaciones forestales como una estrategia viable de adaptación al cambio climático. En el caso de Nuevo San Juan Parangaricutiro se sugiere reemplazar a las poblaciones de baja altitud de *P. pseudostrobus* con poblaciones de *P. devoniana*, originadas de semilla colectada a una altitud de no más de 400 m de menor altitud que el sitio a reforestar.

## INTRODUCCIÓN y ANTECEDENTES

### Diferenciación genética entre poblaciones

México posee recursos genéticos forestales aun sin ser investigados. Para mejorar el aprovechamiento y el manejo de estos recursos, se requiere, entre otras cosas, caracterizar los patrones de variación genética entre y dentro de poblaciones.

El nivel de variación en caracteres cuantitativos entre poblaciones generalmente es el de mayor importancia adaptativa. La diferenciación genética entre poblaciones, significa que cada población está adaptada a una porción de las diferentes condiciones ambientales ocupadas por la especie, con lo cual la especie tiene la capacidad de adaptarse y responder a ambientes heterogéneos (Rehfeldt, 1994; Vitasse *et al.*, 2009). Esta variación genética tiende a seguir un patrón paralelo al gradiente ambiental, que en regiones montañosas frecuentemente es un patrón altitudinal, en donde las poblaciones de altitudes más bajas suelen tener un mayor crecimiento, que las poblaciones de mayor altitud. En zonas montañosas templadas, a las poblaciones de menor altitud un clima más benigno ha favorecido un mayor potencial de crecimiento, mientras que en mayores altitudes, se ha favorecido la resistencia a heladas (Sáenz-Romero *et al.*, 2006; Viveros-Viveros *et al.*, 2009). Patrones similares de variación en altura se han encontrado para *Pinus banksiana* (Mátyás y Yeatman, 1992), *P. brutia* (Isik *et al.*, 2000) y *P. sylvestris* (Rehfeldt *et al.*, 2003); así mismo para peso seco en *P. pseudostrobus*, donde las poblaciones de menor altitud tienen un mayor peso seco (Sáenz-Romero, *et al.*, 2012c).

Con el conocimiento de dichos patrones, es posible delimitar zonas productoras de semillas, las cuales sirven como guía para decidir el movimiento de semillas y plántulas, dentro y entre regiones en los programas de reforestación, y de esta manera garantizar un mejor acoplamiento entre genotipos y ambientes, y por tanto, una mayor adaptación a los sitios de plantación (Sáenz-Romero *et al.*, 2006).

## Efectos potenciales del cambio climático

Las condiciones ambientales que moldean la variación genética, y por tanto controlan la adaptabilidad, no son estáticas. Por ejemplo, los diferentes Modelos Generales de Circulación (GCM, por sus siglas en inglés), de la Met Office del Centro Hadley, del Centro Canadiense para el Modelado y Análisis del Clima, y del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos, ajustados para México mediante modelos climáticos “spline”, proyectan que para la década de 2030, la temperatura aumentará 1.5° C ( $\pm 0.17$ ), y la precipitación disminuirá un 6.7% ( $\pm 4.29$ ). Para la década de 2090, el promedio de los diferentes modelos y escenarios, es un aumento en temperatura de 3.7° C ( $\pm 0.87$ ), y una disminución en precipitación de 18.2% ( $\pm 7.98$ ). Todo esto ocasionará que las condiciones ambientales actuales ocurran a una mayor altitud (Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

Las estimaciones de los modelos anteriores para las décadas de 2030, 2060 y 2090, están basadas en diferentes escenarios de emisiones de gases invernaderos, que a su vez están relacionados al crecimiento económico, poblacional e integración mundial en la adopción de políticas, tecnologías “verdes”, y reducción de emisiones. El escenario A2 asume una alta emisión de gases de una población mundial en constante crecimiento, así como poca integración mundial, y un crecimiento desigual en las diferentes regiones del planeta. El escenario B1 asume una reducción gradual en las emisiones, debido a la introducción de nuevas tecnologías limpias. El escenario B2 asume un crecimiento de la población, pero a una tasa menor a la del escenario A2, así como la introducción de nuevas tecnologías, aunque no de manera tan eficiente como en el escenario B2. El escenario A1B, asume niveles intermedios de emisiones entre A y B, debido a un balance en el uso de combustibles fósiles y no fósiles, así como un rápido crecimiento económico, pero también una rápida introducción de tecnologías limpias (Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

Al integrar los efectos de la temperatura y la precipitación, los índices de aridez suelen ser buenos predictores de la distribución de las especies (en nuestro caso, expresado como un cociente: la raíz cuadrada de los grados días  $> 5^{\circ}\text{C}$ , dividido por la precipitación total anual; mayores valores indican mayor aridez). Se sabe que un

incremento en la aridez, disminuye la capacidad de carga de un sitio, al incrementar el estrés hídrico (Rehfeldt *et al.*, 2008; Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Esto resulta particularmente crítico en la segunda mitad del período de sequía, cuando la humedad residual del suelo puede llegar a ser tan escasa (por la combinación de una menor precipitación en la temporada de lluvias y el incremento de la temperatura en el de sequía) que las plantas se debilitan, se hacen más susceptibles a ataques de plagas y enfermedades, y eventualmente alcanzan el punto de marchitamiento. Un periodo difícil para las especies vegetales, en términos de adaptación al nuevo clima, ocurrirá entre 2030 y 2060, cuando el índice de aridez anual aumente drásticamente debido a un incremento en las temperaturas, simultáneo a una disminución de la precipitación. Tomando en consideración esto, se cree que en términos genéticos y ecológicos, dentro de los próximos 50 a 100 años, las poblaciones de coníferas estarán cada vez menos adaptadas a los sitios que habitan actualmente (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Con un clima más caliente en el futuro, las especies enfrentarían diferentes escenarios, tales como extinción, migración en latitud hacia los polos, o en altitud hacia partes más altas, o un ajuste en los procesos fisiológicos, ya sea por selección o por plasticidad fenotípica (Aitken *et al.*, 2008).

Los efectos del calentamiento global ya empiezan a ser evidentes en diferentes poblaciones de árboles forestales a lo largo del mundo. Es el caso de *Pinus edulis*, en los estados de Arizona, Colorado, Nuevo México y Utah, en los Estados Unidos, donde poblaciones enteras han muerto debido a los efectos de una sequía severa (Breshears *et al.*, 2005). Caso similares se han observado en la parte baja de la distribución del álamo temblón (*Populus tremuloides*), donde recientemente se han registrado muertes repentinas causadas por sequías. Dichos registros confirman algunos modelos predictivos, donde se establece que en las próximas décadas, la distribución geográfica de la especie disminuirá de manera considerable (Rehfeldt *et al.*, 2009).

Se ha observado en las últimas décadas, que los efectos del calentamiento global ya están produciendo cambios en la distribución de las especies; un movimiento a zonas de mayor altitud a un ritmo cercano a los 30 m por década (Lenoir *et al.*, 2008). Debido a la velocidad a la que se cree que progresará el calentamiento global, parece poco probable que las poblaciones alcancen a migrar de manera natural a los lugares

donde se dará su clima actual. Tal es el caso para varias coníferas de Siberia, que para mantener el acoplamiento entre las poblaciones y el ambiente al cual están adaptadas, sería necesario una migración entre 500 y 700 km (Tchebakova *et al.*, 2005). A menos que se promueva una activa reubicación de los genotipos, las poblaciones actuales gradualmente se volverán menos aptas, conforme el calentamiento global progresa; a esto se le llama desfasamiento adaptativo.

Por lo anterior, para asegurar la adaptación de las poblaciones forestales en el futuro, es necesario anticiparse y realinear los genotipos a los ambientes que ocurrirán en el futuro. Esto en general se puede lograr colectando semilla, produciendo planta en vivero y reforestando en un sitio en donde ocurrirá en el futuro el clima para el cual está adaptada la población de la que se colectó la semilla (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Por ejemplo, para *Pinus oocarpa*, el clima de su distribución actual, para la década de 2090, ocurrirá en una elevación mayor, cercana a los 600 metros. Sin embargo, el clima no ha cambiado lo suficiente para realizar una total transferencia de los genotipos hacia la altitud proyectada para asegurar su adaptación en 2090. Un enfoque más apropiado para el presente, sería el de mover los genotipos para acoplarlos a un escenario más cercano, digamos 2030, año para el que la mayoría de los modelos climáticos, coinciden en la magnitud del cambio en las condiciones ambientales. Esta medida, probablemente daría ganancias genéticas a corto plazo, y permitiría contar con fuentes de semillas para futuras migraciones asistidas, que les permitan adaptarse a escenarios más lejanos, por ejemplo, para la década centrada en el año 2060 ó 2090 (Sáenz-Romero *et al.*, 2012b).

### **Los bosques de la Comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro**

La comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, es una comunidad con una notable organización, perteneciente al grupo étnico de los purépechas. Realizan manejo sustentable sobre cerca de 11,000 ha. de bosque de pino, sobre las cuales tiene derecho en base a un acuerdo de propiedad comunitaria. Gran parte de sus bosques están dominados por especies como *Pinus pseudostrobus*, el cual se



distribuye en el área entre los 2300 y 2800msnm, *P. devoniana* (también conocido como *P. michoacana*), entre los 1600 y 2300 msnm, y *P. leiophylla*, entre los 2100 y 2400 msnm.

Recientemente, la Dirección Técnica Forestal de Nuevo San Juan Parangaricutiro, ha reportado en la parte baja de la distribución de *Pinus pseudostrobus*, la declinación y muerte de árboles, aparentemente debido al estrés causado por las sequías relacionado al cambio climático.

En base a los GCM ya descritos, las poblaciones de *Pinus pseudostrobus* tendrían que migrar 300 m hacia arriba para el año 2030, y un poco más de 600 m para 2090. Sin embargo, encontrar una solución específica y más detallada a largo plazo para *P. pseudostrobus*, y en general para todas las especies, es algo complejo, puesto que no se saben las futuras tasas reales de emisión de gases de efecto invernadero, por lo que es complicado predecir el clima futuro a largo plazo con exactitud. En respuesta a esto, Rehfeldt *et al.* (2012), recomiendan que el manejo se dé en base a las predicciones de las que se tienen más certeza. Por el momento, se sugiere un enfoque más conservador, el cual consiste en mover a las poblaciones aproximadamente 300 m hacia arriba, asegurando su adaptación en para la década centrada en el año 2030.

### **Migración asistida**

La migración asistida se define como el movimiento intencional de especies o poblaciones fuera de su rango histórico de distribución, con la finalidad de mitigar pérdidas actuales o futuras de biodiversidad, causadas por el cambio climático. Es un tema controversial debido a que entra en conflicto con los actuales paradigmas conservacionistas, los cuales favorecen el manejo *in situ*, y mantener el rango de distribución actual de las especies, considerando su rango natural. Ha surgido como un importante tema de discusión en los campos de adaptación al cambio climático y estudio de la biodiversidad. El tema se abordó en un artículo pionero de Peters y Darling en 1985, pero recibió muy poca atención hasta 2007, cuando el número de artículos se incrementó dramáticamente, y se intensificó el debate entre los biólogos

conservacionistas, acerca del uso de la migración asistida como estrategia para conservar la biodiversidad en vistas de un inminente cambio climático (Hewitt *et al.*, 2011).

En 2011, se publicó un análisis de la literatura científica correspondiente al tema de migración asistida. De 63 artículos revisados, 57% emplearon revisión de literatura, comentarios o entrevistas; 48% presentaron datos biofísicos basados en investigación empírica, experimentación, modelos, estudios de caso, o reconstrucciones paleobiológicas. Se subrayó el hecho de que son pocas las investigaciones con resultados experimentales originales en el tema, y esto limita la capacidad de tomar decisiones e implementar estrategias adecuadas (Hewitt *et al.*, 2011).

Desde un punto de vista taxonómico, 56% de los artículos revisados se centraron en plantas, especialmente árboles, lo cual refleja su importancia económica, y la preocupación debido a que por su ciclo de vida, una adaptación o migración natural, es más complicada que en otras especies. La mayoría de los artículos (56 de 63) no se asociaron con ningún sector económico o recurso en particular, con la notable excepción del sector forestal, lo cual indica que la migración asistida no es vista todavía como una política o estrategia de manejo aceptada (Hewitt *et al.*, 2011).

De los artículos revisados, 60% fueron a favor, 20% expresaron serias preocupaciones u oposición, y el otro 20% no tenían una posición definida. El hecho que la mayor parte de los artículos proponen la migración asistida como una estrategia de adaptación al cambio climático, no debe ser visto como evidencia de que se ha llegado a un acuerdo. Si la migración asistida realmente se llega a considerar como una estrategia viable, se recomienda que sea de una forma práctica, aprendiendo de las experiencias, y ajustando los planes y políticas en consecuencia. Lo que es más, la falta de investigaciones de primera mano en el tema, nos invita a apoyar, diseñar e implementar este nuevo tipo de trabajos, sobre los cuales es necesario ir estableciendo una base de conocimientos y experiencias (Hewitt *et al.*, 2011).

## Descripción de las especies

### *Pinus leiophylla* (Schiede & Cham)

Árbol de 15 a 25 metros, con una tendencia natural a no tener un fuste recto, de copa irregular y algo rala; corteza delgada al principio y después gruesa, de color ceniciento primero y casi negra después. Las ramillas son erguidas de color café, en ocasiones con tinte azulado en sus partes más tiernas. Es un árbol productor de abundante resina, siendo uno de los mejores productores en el Eje Neovolcánico de México. Es una especie típicamente pionera, por su capacidad de crecer en sitios marginales, o áreas cubiertas por roca volcánica (Musálem y Martínez-García, 2003).

La especie crece en elevaciones desde los 1600 a los 3000 m, pero se le suele encontrar entre los 2200 y los 2750 m. Crece en regiones templadas y templadas calientes. Su rango de temperatura es de -15 a 38 °C, y de precipitación de 700 a 1500 mm. En Michoacán, se encuentra ampliamente distribuido en la zona de transición del Eje Neovolcánico, habiéndose registrado en los municipios de Hidalgo, Charo, Morelia, Pátzcuaro, Ario de Rosales, Uruapan, Los Reyes, Aguililla y otros (COFOM, 2003).

Para esta especie, los estudios de variación son pocos, y la mayoría son para características del cono, o la producción de semilla (Moreno, 1985, en Musalem y Martínez-García, 2003; Gómez-Jiménez *et al.*, 2010; Morales-Velázquez *et al.*, 2010). Entre los pocos estudios que han analizado la variación para caracteres adaptativos, están el de Martínez-Trinidad *et al.* (2002), donde se observó que algunas poblaciones de la región central de México, tienen una mayor capacidad de resistir condiciones de humedad restringida. Dvorak *et al.*, (2007), reportaron que a lo largo de un gradiente latitudinal en México, las poblaciones del norte (Durango) suelen tener mayor altura, y fustes más rectos; algo también observado por Perry (1991). Aunque las poblaciones de la región central (Michoacán), mostraron una mayor resistencia a *Fusarium circinatum* (Dvorak *et al.*, 2007).

*Pinus devoniana* (Lindley)

También conocido como *Pinus michoacana*, árbol de gran porte, llega a alcanzar alturas de 20 a 30 m; de copa redondeada, tronco generalmente recto, y libre de ramas en su parte baja; en general, se encuentra en masas puras que llegan a conformar rodales coetáneos e incoetáneos, aunque también se encuentra asociado con otras coníferas y latifoliadas. Los primeros 2 a 5 años de vida, se mantiene en estado cespitoso, pero al romperlo, tiene buen porte e incrementos considerables. La madera es de consistencia dura, fuerte y moderadamente resinosa, es muy utilizado en la industria de la construcción, fabricación de muebles, cajas, etc. (Musálem y Sánchez-Cruz, 2003).

Su rango altitudinal fluctúa entre los 1200 a 3000 msnm. Su rango de precipitación anual es de 600 a 1600 mm, con una temperatura promedio de 18° C. En Michoacán se encuentra distribuido ampliamente en el Eje Neovolcánico Transversal, como es en los municipios de Los Reyes, Morelia, Parangaricutiro, Cherán, Uruapan, Ziracuaretiro, y en la Sierra Madre del Sur en los municipios de Aguililla y Coalcomán. En la comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, crece en un clima templado húmedo, con abundantes lluvias en verano; con lluvia invernal menor del 5%, temperatura media anual de 18° C, y la del mes más frío entre -3 y 18 °C (COFOM, 2003).

Debido a su amplia distribución y usos maderables en México, es una especie de importancia económica. Se le ha estudiado en diferentes aspectos, fenología, producción de semilla, plagas y enfermedades, propagación, plantaciones, características de la madera, etc. (Musálem y Sánchez-Cruz, 2003). De interés para este trabajo, son los estudios de adaptación, y de variación a nivel de poblaciones, entre los que destacan, el de Vega-Condori (1962, en Musálem y Sánchez-Cruz, 2003) que estudio la aclimatación de siete especies de coníferas a cuatro sitios en diferentes altitudes en la zona central de Costa Rica (60 m, 680 m, 1800 m, y 2800 m de altitud), ensayando *Pinus michoacana*, *P. ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. oocarpa*, entre otros; ese estudio encontró que a los 2800 m, las especies con mejor crecimiento y vigor fueron *P. michoacana*, *P. pseudostrobus* y *P. oocarpa*. Sáenz-

Romero *et al.*, (2012a), realizaron un análisis de variación morfológica, para contribuir a clarificar la taxonomía de la especie, en particular, respecto a la existencia de variedades, donde las poblaciones que se distribuyen entre los 1600 y 1900m pertenecen a la variedad *devoniana*, y las poblaciones entre los 2000 y 2400m pertenecen a la variedad *cornuta*. Sáenz-Romero y Tapia-Olivares (2008), estudiaron la variación genética para la resistencia a heladas en la región de Morelia, Michoacán, México, y encontraron que las poblaciones de mayor altitud muestran mayor resistencia a heladas.

#### *Pinus pseudostrobus* (Lindley)

Es uno de los pinos con fuste más recto, sus individuos llegan a alcanzar de 30 a 40 m de altura. El fuste comúnmente se encuentra desprovisto de ramas a lo largo de 20 a 30 m; son muy cilíndricos y rectos con alta uniformidad. Es un pino con una buena producción de resina, por lo cual es muy apreciado en el estado de Michoacán. Su madera es de color ligeramente amarillo, suave pero fuerte, y escasamente resinosa, por lo que se considera que de buena calidad. Sus largos fustes limpios permiten su uso en aserrío, triplay, chapa, pulpa y papel, así como en la industria de la construcción (CONAFOR, 2010).

En el estado de Michoacán, la especie se encuentra ampliamente distribuida, desde los límites con el estado de México, hasta la región sur occidental, en los municipios de Coalcomán, Aguililla y Tumbiscatío. Crece en suelos profundos, de origen volcánico, sobre pendientes montañosas en elevaciones de 1,600 a 3,200 msnm. Su amplio rango de distribución le permite establecerse en una gran diversidad de climas, tanto subtropicales como templados, con medias de precipitación que van de 800 a 1,500 mm anuales (COFOM, 2003).

Debido a su amplia distribución y usos, es una especie de gran importancia económica, y a la cual durante décadas, se le ha estudiado en diferentes aspectos, fenología, producción de semilla, plagas y enfermedades, propagación, plantaciones, características de la madera, etc. De interés para este trabajo, son los estudios de adaptación y de variación a nivel de poblaciones, entre los que destacan, el realizado

por Viveros-Viveros *et al.*, (2005), donde encontró que la variación temprana del crecimiento entre poblaciones colectadas en un gradiente altitudinal, no muestra diferencias pronunciadas y sólo un patrón sumamente moderado. Sin embargo, fue en la variable de biomasa donde se encontró un pronunciado patrón clinal para peso seco a los dos años, en donde plantas originadas de poblaciones a menor altitud producen más biomasa que las originadas a mayor altitud (Sáenz-Romero *et al.*, 2012c).

En el presente trabajo, se sugiere coleccionar diferentes procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*, distribuidas a lo largo de un gradiente altitudinal, comenzando desde el límite superior de distribución de las especies. La separación de las procedencias en la colecta estará dada por intervalos altitudinales de 100 m. Dichas procedencias se establecerán en ensayos de especies-procedencias a diferentes altitudes, como manera de evaluar el desempeño de las especies a las diferentes condiciones ambientales en el gradiente altitudinal, y de esta manera establecer lineamientos que permitan migrar a las nuevas poblaciones altitudinalmente, con el fin de prevenir los efectos negativos de una baja adaptación a un futuro escenario de calentamiento global.

### **Objetivo General**

Evaluar el desempeño de procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*, en un ensayo de especies-procedencias con enfoque de migración asistida, establecido a diferentes altitudes en La Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, como medida de adaptación al cambio climático.

### **Objetivos Particulares**

Determinar la existencia de variación genética entre procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla* colectadas a lo largo de un gradiente altitudinal, establecidas en un ensayo de especies-procedencias en vivero

Determinar el desempeño de procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla* colectadas a lo largo de un transecto altitudinal, establecidas en varios sitios de plantación dentro y fuera de su rango natural de distribución altitudinal

## REFERENCIAS

- Aitken, S.N.; S. Yeaman; J. A. Holliday; T. Wang; S. Curtis-McLane. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1: 95–111.
- Breshears, D. D.; N. S. Cobb; P. M. Rich; K. P. Price; C. D. Allen; R. G. Balice; W. H. Romme; J. H. Kastensf; M. L. Floyd; J. Belnap; J. J. Anderson; O. B. Myers; C. W. Meyer. 2005. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 42 (102): 15144–15148.
- Comisión Forestal del Estado (COFOM). 2003. Las Coníferas de Michoacán. Boletín Técnico No. 4 Vol. 1. Michoacán, México. 67 p.
- CONAFOR. 2010. *Pinus pseudostrobus* Lindl. var *pseudostrobus*. SIRE-Paquetes Tecnológicos. CONAFOR-CONABIO. (Consultado 23 de mayo de 2010).
- Gómez-Jiménez, D., C. Ramírez-Herrera, J. Jasso-Mata, J. López-Upton. 2010. Variación en características reproductivas y germinación de semillas de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Revista Fitotecnia Mexicana* Vol. 33 (4): 297 – 304.
- Hewitt, N., N. Klenk, A.L. Smith, D.R. Bazely, N. Yan, S. Wood, J.I. MacLellan, C. Lipsig-Mumme, I. Henriques. 2011. Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation* 144: 2560 – 2572.
- Isik, F., S. Keskin, S. E. McKeand, 2000. Provenance variation and provenance–site interaction in *Pinus brutia* Ten.: consequences of defining breeding zones. *Silvae Genetica* 49: 213–223.
- Lenoir, J.; J. C. Gégout, P. A. Marquet, P. de Ruffray, H. Brisse. 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320: 1768- 1771.
- Martínez-Trinidad T., Vargas-Hernández, J., Muñoz-Orozco, A., López-Upton, J. (2002) Respuesta al déficit hídrico en *Pinus leiophylla*: consumo de agua y crecimiento en plántulas de diferentes poblaciones. *Agrociencia* 36:365-376.
- Mátyás, C.; C. W. Yeatman. 1992. Effect of geographical transfer on growth and survival of jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) populations. *Silvae Genetica* 41: 370–376.



- Morales-Velázquez, M.G., C. A. Ramírez-Mandujano, P. Delgado-Valerio, J. López-Upton. 2010. Indicadores reproductivos de *Pinus leiophylla* Schltdl. et Cham. en la cuenca del río Angulo, Michoacán. 2010. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 1 (2): 31 – 38.
- Moreno, B. G. 1983. Estudio de variación morfológica en *Pinus pseudostrobus* Lindl. en 4 localidades de la región central de México. Tesis de licenciatura. Fac. de Agrobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán, México.
- Musálem, M.A., y O. Sánchez-Cruz. 2003. Monografía de *Pinus michoacana* Martínez. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Primera Edición. México, D.F. 230 p.
- Musálem, M.A., y S. Martínez-García. 2003. Monografía de *Pinus leiophylla* Schl. Et Cham. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Primera Edición. México, D.F. 85 p.
- Perry, P. J. 1991. The Pines of México and Central America. Timber Press. Portland, Oregon, EUA. 231 pp.
- Rehfeldt, G. E., 1994. Evolutionary genetics, the biological species, and the ecology of the Interior cedar-hemlock forest. In: Proceedings of Interior cedar-hemlock-white-pine forest: ecology and management. Pullman, Washington State University, pp 91-100.
- Rehfeldt, G. E., Ferguson, D.E., Crookston, N.L. 2008. Quantifying the abundance of co-occurring conifers along inland northwest (USA) climate gradients. Ecology 89 (8): 2127–213.
- Rehfeldt, G.E.; N. M. Tchebakova; L. I. Milyutin; E. I. Parfenova; W. R. Wykoff; N. A. Kouzmina. 2003. Assessing population responses to climate in *Pinus sylvestris* and *Larix spp.* of Eurasia with climate-transfer models. Eurasian J. Forestry 6: 83–98.
- Rehfeldt, G. E.; D. E. Ferguson; N. L. Crookston. 2009. Aspen, climate, and sudden decline in western USA. Forest Ecology and Management 258: 2353–2364.
- Rehfeldt, G.E., Crookston, N.L., Sáenz-Romero, C., Campbell, E. 2012. North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. Ecological Applications 22(1):119-141.
- Sáenz-Romero, C.; R. R. Guzmán-Reyna; G. E. Rehfeldt. 2006. Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, México Implications for

- seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management* 229: 340 – 350.
- Sáenz-Romero, C. y B. L. Tapia-Olivares. 2008. Genetic variation in frost damage and seed zone delineation within an altitudinal transect of *Pinus devoniana* (*P. michoacana*) in México. *Silvae Genetica* 57 (3): 165 – 170.
- Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt; N. L. Crookston; P. Duval; R. St-Amant; J. Beaulieu, B. A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for México and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102: 595–623.
- Sáenz-Romero, C., Aguilar-Aguilar, S., Silva-Farías, M. A., Madrigal-Sánchez, Xavier, Lara Cabrera, S. and López-Upton, J. 2012a. Altitudinal morphological variation among *Pinus devoniana* Lindl. (= *P. michoacana* Martínez) populations and putative variety *cornuta* in central-west México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(13):17-28).
- Sáenz-Romero C., Rehfeldt, G.E., Duval, P., Lindig-Cisneros, R. 2012b. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275:98-106.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., López-Upton, J. 2012c. Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacán, México. Two location shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35(2):111-120
- Tchebakova, N. M.; G. E. Rehfeldt; E. I. Parfenova. 2005. Impacts of climate change on the distribution of *Larix spp.* and *Pinus sylvestris* and their climatypes in Siberia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 861–882.
- Vitasse Y, Delzon S, Bresson CC, Michalet R, Kremer A. 2009a. Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Can J For Res* 39:1259-2009.
- Viveros-Viveros, H.; C. Sáenz-Romero; J. López-Upton; J. J. Vargas-Hernández. 2005. Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en campo. *Agrociencia* 39: 575-587.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I. : height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257:836-842.

## VARIACIÓN ALTITUDINAL ENTRE ESPECIES Y PROCEDENCIAS DE *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. ENSAYO DE VIVERO

### RESUMEN

Los bosques de pino-encino de la Comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, están dominados por *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana*, y *P. leiophylla*. Sin embargo, es insuficiente lo que se conoce de sus patrones de variación genética, particularmente de *P. leiophylla*, lo que limitan la creación de lineamientos para el movimiento de semillas y plántulas para programas de reforestación y su adaptación al cambio climático. Se realizó una colecta de cuatro a cinco procedencias de cada una de las especies a lo largo de un transecto altitudinal (1650 a 2500 m) y se estableció un ensayo de vivero, con el objetivo de cuantificar la variación genética entre y dentro de especies. Se encontraron diferencias significativas en altura de planta (tres y cinco meses de edad) entre especies. Entre procedencias hubo diferencias significativas para *Pinus devoniana* y *P. leiophylla*, con un pronunciado patrón de crecimiento asociado a la altitud de origen para la primera especie, en donde la procedencia de menor altitud mostró mayor crecimiento. Para *P. leiophylla*, las diferencias entre poblaciones fueron significativas sólo a los tres meses de edad, sin un patrón altitudinal estadísticamente significativo. No se encontraron diferencias significativas entre poblaciones de *P. pseudostrobus*.

**Palabras clave:** Variación genética, migración asistida, Nuevo San Juan Parangaricutiro.

### INTRODUCCION

Las poblaciones de especies forestales con distribución natural a través de gradientes altitudinales, tienden a diferenciarse genéticamente en los distintos caracteres de crecimiento y adaptación, como respuesta a las diferentes presiones de selección impuestas por el ambiente. Es necesaria la comprensión de dichos patrones de variación genética, para crear lineamientos para el movimiento de semillas y

plántulas, buscando un adecuado acoplamiento entre genotipos y los ambientes para los que están adaptados (Rehfeldt, 1988; Rehfeldt, 1991).

La Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (NSJP), Michoacán, es una comunidad con una notable organización, perteneciente al grupo étnico de los *Purépechas*. Realizan manejo sustentable en aproximadamente 11,000 ha de bosque de pino y encino, bajo un régimen de propiedad comunitaria (Velázquez-Montes, Fregoso-Domínguez, Bocco-Verdinelli & Cortez-Jaramillo, 2003). Gran parte de sus bosques están dominados por especies como *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* (también conocido como *P. michoacana*), y *P. leiophylla* (Medina-García et al, 2000). Por ello, es de interés para la Dirección Técnica Forestal (DTF) de la Comunidad Indígena de NSJP conocer los patrones de diferenciación genética entre las especies y entre las poblaciones, para seleccionar las mejores fuentes de semilla, para su uso en reforestaciones de restauración ecológica, conservación de sus recursos y plantaciones comerciales.

Debido a su distribución relativamente amplia, rápido crecimiento en sitios de buena calidad, rectitud de fuste y buena calidad de la madera, *P. pseudostrobus* es una especie de gran importancia económica en la región, de la cual se han estudiado los patrones de variación entre procedencias de la región de NSJP (Viveros-Viveros, Sáenz-Romero, López-Upton & Vargas-Hernández, 2005; Viveros-Viveros, Sáenz-Romero, Vargas-Hernández, & López-Upton, 2006) En menor medida existen estudios publicados de variación genética entre procedencias para *P. devoniana* (Aguilar-Aguilar, 2006; Sáenz-Romero y Tapia-Olivares, 2008). Para *P. leiophylla* son prácticamente inexistentes los ensayos de procedencias en México, aunque se han establecido en Brasil y Sudáfrica (Dvorak, Hodge, & Kietzka, 2007).

El cambio climático representa un reto adicional para acoplar los genotipos a los ambientes. Se estima que para el año 2030, en México habrá un aumento en la temperatura promedio anual (comparado al promedio 1961-1990) de 1.5°C, y una disminución de precipitación del 7 % (Sáenz-Romero et al., 2010). Ello significará un desacoplamiento entre las poblaciones de especies forestales y el clima para el cual están adaptadas, que inducirá un gradual decaimiento de las poblaciones, particularmente en los límites inferiores de su distribución altitudinal natural, tal como ya

está ocurriendo en otras partes del mundo (Breshears et al, 2005; Jump, Hunt & Peñuelas, 2006; Peñuelas, Oyaga, Boada & Jump, 2007; Rehfeldt, Ferguson & Crookston, 2009; Allen et al, 2010). Este decaimiento causara una disminución de la productividad (lo cual impactará el ingreso económico de la Comunidad Indígena), y posteriormente un probable severo deterioro de la cubierta forestal.

Por ello, es necesario realizar migración asistida de poblaciones forestales, a fin de reacoplarlas al clima para el que están adaptadas. Ello requeriría tener comprensión sobre los patrones de diferenciación genética entre poblaciones a lo largo de gradientes ambientales, tales como los gradientes altitudinales (Rehfeldt, 1988; Rehfeldt, 1991).

Lo anterior es de particular importancia para la Dirección Técnica Forestal de la Comunidad Indígena de NSJP, la cual está actualmente considerando opciones de manejo para adaptarse al cambio climático. La mayor preocupación de la DTF-NSJP es el posible decaimiento de los rodales de *Pinus pseudostrobus*, lo que muy probablemente ocurrirá en su límite altitudinal inferior (la especie se distribuye entre los 2200 y los 2900 m en la región). El candidato natural a reemplazar las poblaciones de baja altitud de *Pinus pseudostrobus* (aquellas entre 2200 y 2400 m), serían las poblaciones de media a elevada altitud de *P. devoniana* (el intervalo altitudinal de la especie en la región es de 1650 a 2300 m).

El objetivo de este trabajo es cuantificar los patrones de variación genética entre y dentro de poblaciones de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*, en el intervalo altitudinal en el cual podría llevarse a cabo acciones de migración asistida en el corto plazo.

## **METODOLOGIA**

Se colectaron conos de cuatro poblaciones de *Pinus pseudostrobus* y de *P. leiophylla* y cinco de *P. devoniana*, a lo largo de un transecto altitudinal, a intervalos de 100 m de diferencia altitudinal (en todos los casos excepto en una población), desde los 2520 m (cercano al límite superior de distribución en la región de *P. leiophylla* en NSJP y parte media de la distribución de *P. pseudostrobus*), hasta los 1650 m (límite inferior

de la distribución de *P. devoniana*). (Cuadro 1). El diseño del muestreo obedece a la intención de incluir la variación contenida en el rango de distribución altitudinal de *P. leiophylla* y de *P. devoniana*, que en una eventual migración asistida, tendrían que reemplazar a las poblaciones del límite altitudinal inferior de *P. pseudostrobus*. Durante la colecta de *P. devoniana*, entre el sitio de 2034 m de altitud y el de 1650, no fue posible coleccionar poblaciones de esta especie, ya que las mismas han sido eliminadas o seriamente fragmentadas (con una densidad dramáticamente disminuida), para establecer huertas de aguacate (*Persea americana*). Todos los sitios tuvieron la misma exposición (sureste). En cada sitio, se colectaron cinco conos con semilla de polinización abierta de cada uno de 11 árboles de cada población y de cada especie. En lo sucesivo nos referiremos a población como el conjunto de individuos representados por las muestras y la localidad de cada población es la procedencia.

Cuadro 1. Sitios de colecta de conos de las tres especies de pino en la región de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Pseu = *P. pseudostrobus*, Leio = *P. leiophylla*, Devo = *P. devoniana*.

| Sitio | Latitud       | Longitud       | Altitud (m) | Especie colectada |
|-------|---------------|----------------|-------------|-------------------|
| 1     | 19° 27' 34.4" | 102° 11' 43.6" | 2520        | Pseu              |
| 2     | 19° 26' 50.1" | 102° 11' 00.5" | 2422        | Pseu, Leio        |
| 3     | 19° 26' 24.6" | 102° 10' 29.6" | 2310        | Pseu, Leio, Devo  |
| 4     | 19° 26' 05.1" | 102° 10' 08.3" | 2217        | Pseu, Leio, Devo  |
| 5     | 19° 25' 42.1" | 102° 09' 34.6" | 2110        | Leio, Devo        |
| 6     | 19° 25' 28.9" | 102° 08' 57.8" | 2034        | Devo              |
| 7     | 19° 23' 03.9" | 102° 04' 47.4" | 1650        | Devo              |

Una vez colectados los conos, se extrajo la semilla, y se germinó en una cámara de crecimiento, a una temperatura constante de 25° C, con una alternancia de luz y oscuridad en periodos de 12 h. Las semillas germinadas se sembraron en envases de 350 cm<sup>3</sup>, con una mezcla de turba de musgo (*peatmoss*), agrolita y vermiculita, en proporciones 2:1:1, y un litro de fertilizante de lenta liberación lenta, por cada m<sup>3</sup> de sustrato mezclado.

En febrero de 2011, con las plántulas se estableció en vivero un ensayo de especies-procedencias, con un diseño experimental de bloques completos al azar, con tres especies como parcelas grandes, cuatro procedencias (cinco en el caso de *P. devoniana*) como parcelas chicas, 12 bloques y nueve plantas por parcela chica en hilera. Para asegurar la representatividad de la variabilidad dentro de procedencias, cada una de las nueve plantas de las parcelas chicas procedía de un árbol madre diferente, tomada al azar de entre la progenie de medios hermanos de los 11 árboles colectados por procedencia. El ensayo se estableció en una casa de sombra (35 %), en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Morelia (CIEco-UNAM). Se evaluó altura (cm) a los 3 y 5 meses de edad (mayo y julio del 2011).

Con el objetivo de determinar si había diferencias entre especies y entre procedencias, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el Procedimiento GLM del programa estadístico SAS (SAS Institute, 2004), con el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + P_j(S_i) + B_k + S_i*B_k + B_k*P_j(S_i) + E_{ijkl}$$

Donde:

$Y_{ijkl}$  = observación del  $l$ -ésimo individuo de la  $j$ -ésima procedencia de la  $i$ -ésima especie en el  $k$ -ésimo bloque

$\mu$  = media general de la población

$S_i$  = efecto de la  $i$ -ésima especie

$P_j(S_i)$  = efecto de la  $j$ -ésima procedencia anidada en la  $i$ -ésima especie

$B_k$  = efecto del  $k$ -ésimo bloque

$S_i*B_k$  = efecto de la interacción de la  $i$ -ésima especie con el  $k$ -ésimo bloque

$B_k*P_j(S_i)$  = efecto de la interacción de la  $j$ -ésima procedencia anidada en la  $i$ -ésima especie con el  $k$ -ésimo bloque

$E_{ijkl}$  = error

Con el objetivo de examinar con mayor detalle la variación entre procedencias dentro de especie, se realizó un ANOVA separado para cada especie, utilizando una

reducción del modelo anterior, donde se elimina el efecto de la especie ( $S_i$ ), así como sus interacciones.

Se realizó un análisis de regresión (SAS Institute, 2004), entre el crecimiento promedio de cada población y su altitud de origen, con la finalidad de determinar si existe un patrón de variación altitudinal.

## RESULTADOS y DISCUSION

### Diferencias entre especies

Se encontraron diferencias significativas entre especies y entre procedencias dentro de especies en altura de planta a los 3 meses y 5 meses de edad (Cuadro 2). A los 3 meses de edad, la variación entre especies fue del 25 % de la varianza total, y del 52% a los 5 meses de edad, lo cual es un porcentaje sumamente elevado, si se compara por ejemplo, con el 18% mostrado entre cuatro especies de pinos reportado por Salazar-García *et al.*, (1999).

Cuadro 2. Porcentaje de contribución a la varianza total (%), y significancia (P) del análisis de varianza en conjunto de las tres especies de altura de planta a los 3 y 5 meses de edad.

| Fuente de Variación         | 3 meses |        | 5 meses |        |
|-----------------------------|---------|--------|---------|--------|
|                             | %       | P      | %       | P      |
| Especie                     | 25      | <.0001 | 55      | <.0001 |
| Procedencia(Especie)        | 6       | <.0001 | 4       | <.0001 |
| Bloque                      | 5       | 0.0009 | 2       | 0.0035 |
| Bloque*Especie              | 2       | 0.0499 | 2       | 0.198  |
| Bloque*Procedencia(Especie) | 1       | 0.3718 | 2       | 0.0305 |
| Error                       | 61      |        | 34      |        |

A los tres meses de edad, *P. pseudostrobus* mostró el mayor crecimiento (8.8 cm en promedio), seguido de *P. leiophylla* (6.4 cm) y *P. devoniana* (5.6 cm; Figura 1). Sin embargo, a los 5 meses de edad, *P. leiophylla* superó a *P. pseudostrobus* (26.1 cm y 24.3 cm, respectivamente) (Figura 1). Esto es un resultado sorprendente, considerando que existe una idea extendida de que *P. pseudostrobus* tiene uno de los mejores



crecimientos en comparación con las especies de pino con las que co-habita. Esto indica que *P. leiophylla* podría ser una buena alternativa en los programas de reforestación en la Meseta Purépecha de Michoacán, debido también a su capacidad para crecer en suelos pobres (Musalem y Martínez-García, 2003), y resistir condiciones de humedad restringida (Martínez-Trinidad, Vargas-Hernández, Muñoz-Orozco & López-Upton, 2002).

En contraste, *P. devoniana* tuvo una altura mucho menor (12.7cm), seguramente debido a su condición de estado cespitoso, durante el cual se desacelera o suspende el crecimiento primario, promoviéndose en su lugar el desarrollo de la raíz y el crecimiento secundario (Schmidting y White 1989; Perry, 1991).

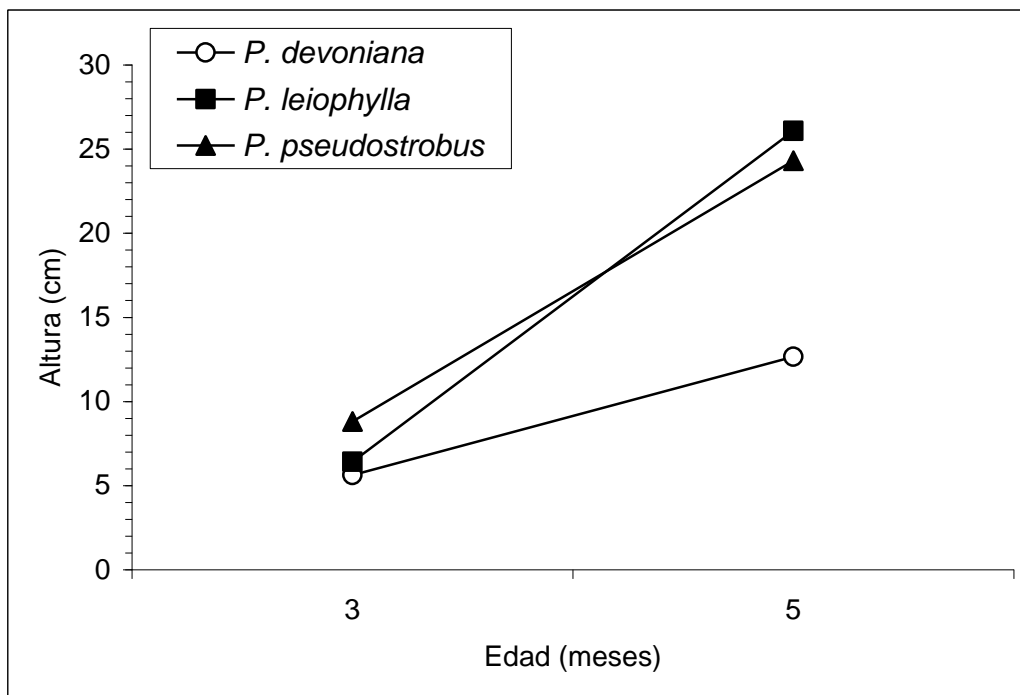


Figura 1. Comparación y comportamiento del crecimiento de las 3 especies evaluadas, a los 3 y 5 meses de edad.

### Diferencias entre procedencias y patrón altitudinal

Cuando el ANOVA se realiza por separado para cada una de las especies, las diferencias entre procedencias dentro de especies son significativas solamente para *P.*

*devoniana* (3 y 5 meses de edad,  $P < 0.0001$ ) y para *P. leiophylla* (sólo a los 3 meses de edad,  $P = 0.0352$ ), pero no para *P. pseudostrobus* (Cuadro 3). La contribución a la varianza total de la variación entre procedencias de *P. devoniana*, es del 29% y el 39%, para las edades de tres y cinco meses, respectivamente. Esto es una contribución muy elevada, considerando que la variación entre procedencias en ensayos de vivero es común por debajo del 15 %; por ejemplo, es del 3% para *Picea glauca* (Li, Beaulieu, Corriveau & Bousquet, 1993), del 5% para *Pinus patula* (Sáenz-Romero, Beaulieu, & Rehfeldt, 2011a; Sáenz-Romero, Ruíz-Talonia, Beaulieu, Sánchez-Vargas & Rehfeldt, 2011b), y del 15% para *Pinus pseudostrobus* (Viveros-Viveros *et al.*, 2005) y *Abies alba* (Vitasse, Delzon, Bresson, Michalet & Kremer, 2009).

Cuadro 3. Porcentaje de contribución a la varianza total (%), y significancia (P) del análisis de varianza para cada una de las tres especies, para altura de planta (cm) a los 3 y 5 meses de edad.

| Fuente<br>variación | <i>Pinus devoniana</i> |        |         |        | <i>P. leiophylla</i> |        |         |        | <i>P. pseudostrobus</i> |        |         |        |
|---------------------|------------------------|--------|---------|--------|----------------------|--------|---------|--------|-------------------------|--------|---------|--------|
|                     | 3 meses                |        | 5 meses |        | 3 meses              |        | 5 meses |        | 3 meses                 |        | 5 meses |        |
|                     | %                      | P      | %       | P      | %                    | P      | %       | P      | %                       | P      | %       | P      |
| Procedencia         | 29                     | <.0001 | 39      | <.0001 | 3                    | 0.0352 | 0       | 0.6656 | 0                       | 0.8758 | 0       | 0.3937 |
| Bloque              | 5                      | 0.0127 | 4       | 0.0069 | 13                   | 0.0004 | 10      | 0.0757 | 8                       | 0.0011 | 9       | 0.0006 |
| Bloq*Proc           | 8                      | 0.0095 | 2       | 0.2372 | 2                    | 0.2567 | 9       | 0.0053 | 0                       | 0.6936 | 0       | 0.7529 |
| Error               | 58                     | -      | 55      | -      | 81                   | -      | 81      | -      | 92                      | -      | 91      | -      |

Las diferencias entre procedencias tienen un patrón altitudinal distinto para cada especie y edad. *P. devoniana* presenta en forma consistente a las dos edades evaluadas un mayor crecimiento de la población originada a la menor altitud (1630 m), en comparación a las cuatro poblaciones de mayor altitud. El patrón de variación entre poblaciones es clinal a los tres meses ( $r^2 = 0.89$ ,  $P = 0.0169$ , Figura 2) y discontinuo a los cinco meses, con una marcada diferenciación entre la procedencia de menor altitud (1650 m) y las de la parte media y alta (2000 a 2300 m;  $r^2 = 0.79$ ,  $P = 0.0426$ , Figura 3).

En contraste, para *P. leiophylla* a los tres meses de edad, las poblaciones de la parte central de la distribución altitudinal crecieron más que las de los extremos superior e inferior del intervalo natural de la distribución altitudinal, que si bien se ajusta a un

modelo cuadrático de regresión, no es estadísticamente significativo ( $r^2 = 0.77$ ,  $P = 0.4835$ ; Figura 2). Este patrón desaparece a los 5 meses de edad (Figura 3).

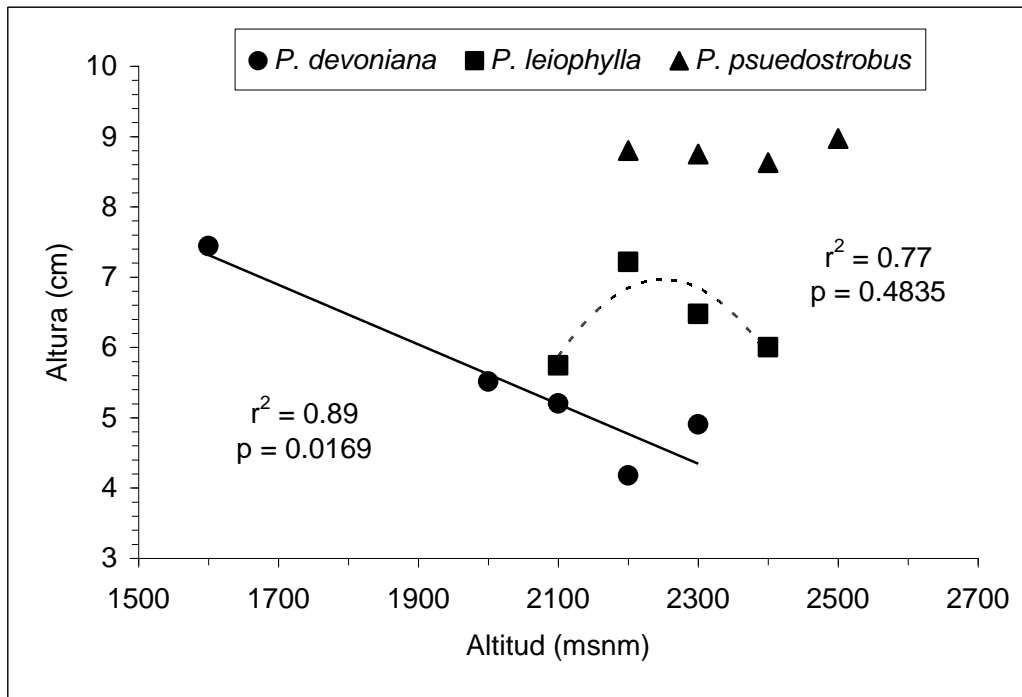


Figura 2. Relación entre altura de planta promedio por especie y por procedencia, contra altitud (m) de origen. Tres meses de edad en vivero.

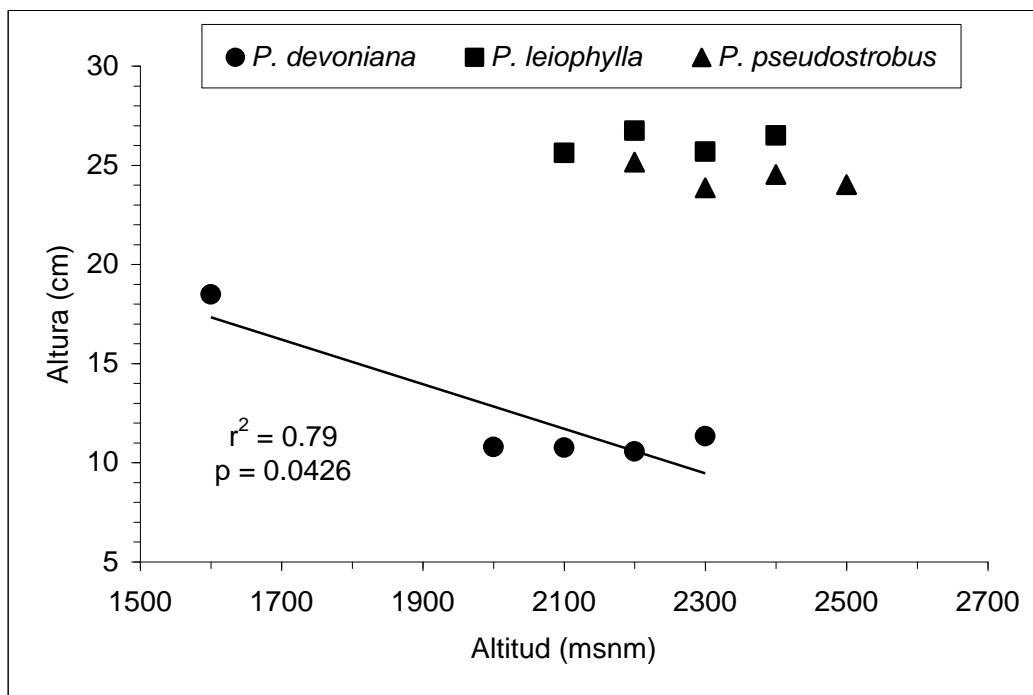


Figura 3. Relación entre altura de planta promedio por especie y por procedencia, contra altitud (m) de origen. Cinco meses de edad en vivero.

El patrón altitudinal de variación entre procedencias de *P. devoniana* es similar al reportado en un ensayo de procedencias previo con la misma especie, en el centro-norte de Michoacán, también a lo largo de un gradiente altitudinal (Tumbisca, 1650 m, a San Miguel del Monte, 2400 m, en las cercanías de Morelia). En ese estudio se observaron diferencias significativas entre procedencias, en donde las poblaciones de menor altitud muestran mayor crecimiento, y una expresión menos pronunciada del estado cespitoso (Aguilar-Aguilar, 2006). También se ha encontrado para *P. devoniana* una menor resistencia al daño por heladas de las poblaciones de baja altitud respecto a las de elevada altitud (Sáenz-Romero y Tapia-Olivares, 2008). La asociación negativa entre crecimiento y resistencia al daño por heladas se considera una estrategia de adaptación a los sitios de mayor altitud (Vitasse *et al.*, 2009). Estrategias similares de adaptación se han observado en otras especies, como *P. hartwegii* (Viveros-Viveros *et al.*, 2009), *P. pseudostrobus* y *P. montezumae* (Jasso, Martínez & Jiménez, 1997; Viveros-Viveros, Sáenz-Romero, López-Upton, & Vargas-Hernández, 2007). En estas especies, en las partes bajas de distribución se encuentran las especies (*P. pseudostrobus*), o poblaciones con mayor crecimiento, y en las partes altas de distribución altitudinal se encuentran las especie (*P. montezumae*), o poblaciones con menor crecimiento y expresión más pronunciada del estado cespitoso.

El patrón altitudinal de *P. leiophylla* a los tres meses de edad, es similar al mostrado por poblaciones de *P. oocarpa* de la región de Uruapan, Michoacán (Sáenz-Romero, Guzmán-Reyna & Rehfeldt, 2006), y plantas a temprana edad originadas de poblaciones de *P. patula* de la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca (Sáenz-Romero *et al.*, 2011b). Este patrón de variación genética es común cuando el clima óptimo para las poblaciones se encuentra a altitudes intermedias de su rango natural de distribución altitudinal, en donde se encuentran las mejores condiciones para expresar su potencial de crecimiento (Rehfeldt *et al.*, 2002). Conforme las poblaciones ocupan sitios alejados de su óptimo, hacia arriba o hacia abajo en el gradiente altitudinal, las condiciones ambientales se vuelven más severas, y la presión de selección se intensifica. Debido a

esto, la estructura genética tiene que adaptarse a condiciones más adversas, muchas veces sacrificando crecimiento para dar lugar a características de mayor valor adaptativo (Mátyás et al, 2010), tales como resistencia a heladas (en la parte alta de su distribución altitudinal) o resistencia a sequía (en la parte baja).

El hecho de que a los tres meses de edad existen diferencias significativas entre procedencias de *P. leiophylla*, pero el patrón altitudinal (si bien con una tendencia cuadrática) no es estadísticamente significativo, y a los cinco meses de edad las diferencias entre procedencias de *P. leiophylla* dejan de ser significativas, debe tomarse con cautela. Se han documentado casos en los que poblaciones originadas a lo largo de un gradiente altitudinal no muestran diferencias significativas en vivero (Sáenz-Romero, Viveros-Viveros & Guzmán-Reyna, 2004), pero a edades posteriores en campo las mismas procedencias si se diferencian (Sáenz-Romero et al., 2006).

La ausencia de diferencias entre las poblaciones de *P. pseudostrobus* para la variable altura de planta, coincide con un estudio de jardín común entre procedencias colectadas en un gradiente altitudinal para la misma especie y región (NSJP, Michoacán), en el que no se encontraron diferencias significativas a los dos años de edad (Sáenz-Romero et al., 2012). Esas mismas procedencias, también a los dos años de edad pero en ensayos de campo, mostraron un patrón de variación altitudinal sumamente moderado (Viveros-Viveros et al., 2005). Sin embargo, otras variables pueden mostrar patrones de diferenciación genética altitudinal bien definidos: en el ensayo de jardín común, se encontró un pronunciado patrón clinal para peso seco a los dos años, en donde plantas originadas de poblaciones a menor altitud producen más biomasa que las originadas a mayor altitud (Sáenz-Romero et al., 2012).

### **Implicaciones para manejo, y ante escenarios de cambio climático**

Las diferencias significativas en altura de planta entre las poblaciones de *P. devoniana*, confirma la necesidad de utilizar una zonificación altitudinal para decidir el movimiento de semillas y plantas en programas de reforestación con esta especie. Se sugiere confirmar esta tendencia a edades posteriores, y confirmar o re-delinear las

zonas altitudinales para esta especie desarrolladas previamente en base a resistencia a heladas (Saéñz-Romero y Tapia-Olivares, 2008). Por tanto, el posible movimiento altitudinal que se llegara a hacer en un manejo que incluya la migración asistida, debe considerar las diferencias genéticas entre poblaciones de *P. devoniana*.

Para *P. leiophylla*, de confirmarse a edades posteriores y/o en ensayos de campo que no existe diferenciación entre poblaciones a lo largo de gradientes altitudinales, las decisiones sobre el movimiento de semillas y plantas de programas de reforestación se simplifican. Es decir, las semillas y plantas podrían moverse libremente dentro de los límites de distribución de la especie en la región, sin poner en riesgo la adaptación de los individuos en el clima contemporáneo. De realizarse migración asistida, podría emplearse cualquier población (se insiste, de confirmarse la tendencia expresada a los 5 meses).

Dependiendo cual sea el comportamiento de *P. pseudostrobus* en evaluaciones futuras, y en otras variables, será la estrategia a seguir. Si en el futuro se manifestara una diferenciación entre poblaciones, será necesario re-delinear las zonas previamente establecidas (ver Sáenz-Romero *et al.*, 2012) para decidir el movimiento de semillas y plantas. Si, por el contrario, se confirma la no existencia de diferenciación, las semillas y plantas podrían moverse libremente dentro de la zona, al igual que *P. leiophylla*. Por ahora, existe evidencia de que las poblaciones si están genéticamente diferenciadas para el carácter de peso seco expresado a los dos años de edad (Sáenz-Romero., *et al* 2012)

Considerando los inminentes efectos del cambio climático, es importante empezar a planear prácticas de manejo que ayuden a realinear las poblaciones forestales al clima para el cual están adaptadas. Sería de suma importancia el establecimiento de ensayos de campo de migración asistida, con movimiento altitudinal de poblaciones y especies, como estrategia para evaluar la adaptación o desadaptación de las plantas. Esto permitiría tener una valoración más objetiva de los riesgos o beneficios de la migración asistida. Para el caso concreto de la Comunidad Indígena de NSJP, los experimentos de campo deben contemplar el reemplazo de las poblaciones de menor altitud de *P. pseudostrobus* por especies y poblaciones más tolerantes a la sequía, como podrían ser *P. devoniana* y *P. leiophylla*.

## CONCLUSIONES

Se encontraron diferencias significativas en el crecimiento en vivero entre *Pinus devoniana*, *P. leiophylla*, y *P. pseudostrobus*, evaluadas a los tres y cinco meses de edad.

Para *P. devoniana* se encontraron diferencias de crecimiento entre poblaciones, con un patrón de crecimiento asociado a la altitud de origen, donde la procedencia de menor altitud mostró mayor crecimiento. *P. leiophylla* mostró a los tres meses de edad diferencias significativas entre poblaciones, pero no un patrón altitudinal estadísticamente significativo. No se encontraron diferencias significativas entre poblaciones de *P. pseudostrobus*.

El posible movimiento altitudinal que se llegara a hacer en un manejo que incluya la migración asistida, debe considerar las diferencias genéticas entre poblaciones de *P. devoniana*.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Aguilar, S. (2006). *Variación genética altitudinal entre procedencias de Pinus devoniana Lindl., evaluadas en un ensayo de corta duración*. Tesis de Maestría. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., ...Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.001.
- Breshears, D.D., Cobb, N. S., Rich, P. M., Price, K. P., Allen, C. D., Balice, R. G., ...Meyer, C. W. (2005). Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 102, 15144–15148.
- Dvorak, W. S., Hodge, G. R., & Kietzka, J. E. (2007). Genetic variation in survival, growth, and stem form of *Pinus leiophylla* in Brazil and South Africa and provenance

resistance to pitch canker. *Southern Hemisphere Forestry Journal*, 69(3), 125–135. DOI: 10.2989/SHFJ.2007.69.3.1.351

Jasso, M. J., Martínez, I., & Jiménez, M. (1997). Evaluación del crecimiento de dos especies del género *Pinus* en una plantación. In: *III Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales*. Nov. 97. Linares, Nuevo León, México. Pag. 5.

Jump, A. S., Hunt, J. M., & Peñuelas, J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12, 2163–2174. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x

Li, P., Beaulieu, J., Corriveau, A., & Bousquet, J. (1993). Genetic variation in juvenile growth and phenology in a White Spruce provenance-progeny test. *Silvae Genetica*, 42 (1), 52–60.

Martínez-Trinidad, T., Vargas-Hernández, J., Muñoz-Orozco, A., & López-Upton, J. (2002). Respuesta al déficit hídrico en *Pinus leiophylla*: consumo de agua y crecimiento en plántulas de diferentes poblaciones. *Agrociencia*, 36, 365–376. En línea: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=30236310>

Mátyás, C., Berki, I., Czúcz, B., Gálos, B., Móricz, N., & Rasztovits, E. (2010). Future of beech in Southern Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silv.Lign.Hung*, 6, 91–110. En línea: [http://www.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/acta\\_silvatica/cikkek/Vol06-2010/08\\_matyas\\_et\\_al\\_p.pdf](http://www.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/acta_silvatica/cikkek/Vol06-2010/08_matyas_et_al_p.pdf)

Medina-García, C., Guevara-Féfer, F., Martínez-Rodríguez, M. A., Silva-Sáenz, P., Chávez-Carbajal, M. A., & García-Ruiz, I. (2000). Estudio florístico en el área de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Acta botánica Mexicana*, 52, 5–41. En línea: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/574/57405202.pdf>

Musalem, M.A., & Martínez-García, S. (2003). *Monografía de Pinus leiophylla Schl. Et Cham.* (1ª Edición). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D.F.

Peñuelas, J., Oyaga, R., Boada, M., & Jump, A. S. (2007). Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30, 830–838. DOI: 10.1111/j.2007.0906-7590.05247.x

Perry, P. J. (1991). *The Pines of México and Central America*. Timber Press. Portland, Oregon, EUA.



- Rehfeldt, G.E. (1988). Ecological genetics of *Pinus contorta* from the Rocky Mountains (USA): a synthesis. *Silvae Genetica*, 37 (3-4),131–135. En línea: [http://www.bfafh.de/inst2/sg-pdf/37\\_3-4\\_131.pdf](http://www.bfafh.de/inst2/sg-pdf/37_3-4_131.pdf)
- Rehfeldt, G. E., (1991). Gene resource management: Using models of genetic variation in silviculture. *In: Proceedings Genetics/Silviculture workshop*. USDA Forest Service. Wenatchee, Washington. August 27-31, 1990.
- Rehfeldt, G.E., Ferguson, D. E., & Crookston, N. L. (2009). Aspen, climate and sudden decline in western USA. *Forest Ecology and Management*, 258, 2353–2364. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.06.005.
- Rehfeldt, G.E., Tchebakova, N. M., Parfenova, Y. I., Wykoff, W. R., Kuzmina, N. A., & Milyutin, L. I. (2002). Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology*, 8, 912–929. En línea: [http://forest.akadem.ru/PDF/060322/tchebakova\\_9.pdf](http://forest.akadem.ru/PDF/060322/tchebakova_9.pdf)
- Sáenz-Romero, C., Beaulieu, J., & Rehfeldt, G. E. (2011a). Altitudinal genetic variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, Mexico, in growth Chambers simulating global warming temperatures. *Agrociencia*, 45, 399–411. En línea: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=30219764012>
- Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna, R., & 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. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.04.014.
- Saenz-Romero, C., Rehfeldt, G.E., Crookston, N.L., Pierre, D., St-Amant, R., Bealieu, J. & Richardson, B. (2010). Contemporary and projected spline climate surfaces for Mexico and their use in understanding climate-plant relationships. *Climatic Change*, 102, 595–623. DOI: 10.1007/s10584-009-9753-5
- Sáenz-Romero. C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, A., Zamarripa-Morales, V., & López-Upton, J. (2012). Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrabus* populations from Michoacán, México. Two location shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32 (2), 111–120. En línea: <http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/35-2/2a.pdf>
- Sáenz-Romero, C., Ruíz-Talonia, L. F., Beaulieu, J., Sánchez-Vargas, N. M., & Rehfeldt, G. E. (2011b). Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34

(1), 19–25. En línea: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=61017038003>

Sáenz-Romero, C. & Tapia-Olivares, B. L. (2008). Genetic variation in frost damage and seed zone delineation within an altitudinal transect of *Pinus devoniana* (*P. michoacana*) in México. *Silvae Genetica*, 57 (3), 165–170. En línea: [http://www.bfafh.de/inst2/sg-pdf/57\\_3\\_165.pdf](http://www.bfafh.de/inst2/sg-pdf/57_3_165.pdf)

Sáenz-Romero, C., Viveros-Viveros, H., & Guzmán-Reyna, R. (2004). Altitudinal genetic variation among *P. oocarpa* populations in Michoacán, western México. Preliminary results from a nursery test. *Forest Genetics*, 11 (3-4), 341–349.

Salazar-García, J., Vargas-Hernández, J., Jasso-Mata, J., Molina-Galán, J., Ramírez-Herrera, C., & 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. En línea: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/617/61750203.pdf>

SAS Institute. (2004). SAS/STAT Guide for personal computers. Version 9.1. SAS Institute, Cary, N. C. USA. 1028 p.

Schmidting, R. C. & White, T. L. (1989). Genetics and tree improvement of longleaf pine. In: *Proceedings of the Symposium on the Management of Longleaf Pine, Long Beach, MS*, Abril 4-6, 1989. New Orleans, LA: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station (now Asheville, NC, USDA Forest Service, Souther Research Station), 114–127.

Velázquez-Montes, A., Fregoso-Domínguez, A., Bocco-Verdinelli, G. & Cortez-Jaramillo, G. (2003). The use of a landscape approach in Mexican forest indigenous communities to strengthen long-term forest management. *Interciencia*, 28 (11), 632–638. En línea : <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/339/33908602.pdf>

Vitasse, Y., Delzon, S., Bresson, C. C., Michalet, R., & Kremer, A. (2009). Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Can J For Res*, 39, 1259–2009. En línea: <http://sylvain-delzon.com/wordpress/www/wp-content/uploads/Vitasse-et-al.-2009-CJFR.pdf>

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. (2005). Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl en campo. *Agrociencia*, 39 (5), 575–587. En línea: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2005/sep-oct/art-11.pdf>

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. (2007). Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrobus*, *P.*

*montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacán, México. *Forest Ecology and Management*, 253, 81–88. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.07.005.

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J.J., y López-Upton, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29 (2),121–126. En línea: <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/610/61029204.pdf>

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

**Migración asistida altitudinal de poblaciones de *Pinus devoniana*, *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus* en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán.**

**RESUMEN**

El cambio climático ha incrementado el interés en conocer como se modifican las respuestas en crecimiento y producción de los bosques ante los cambios ambientales. Los ensayos de procedencias de especies forestales, en los que se colecta semilla de poblaciones naturales, y se plantan en sitios con diferentes condiciones ambientales, pueden ser considerados como un cambio climático experimental, y sus resultados pueden ayudar a desarrollar estrategias de manejo para facilitar la adaptación al cambio climático. Se colectaron diferentes procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*, distribuidas a lo largo de un gradiente altitudinal, con una separación de 100 m entre cada procedencia, comenzando desde el límite superior de distribución de las especies. Se establecieron ensayos de procedencias en tres sitios a diferentes altitudes (2100, 2400 y 2700m), como manera de evaluar el desempeño de las especies a las diferentes condiciones ambientales en el gradiente altitudinal. Se encontraron diferencias entre sitios para todas las variables de crecimiento (altura, crecimiento, crecimiento relativo, peso seco). Se encontraron diferencias entre especies para todas las variables de crecimiento, con la excepción de crecimiento relativo. Sólo para las *P. devoniana* se encontraron diferencias significativas entre poblaciones en crecimiento y crecimiento relativo. No se encontraron diferencias significativas en ninguna variable entre las poblaciones de *P. leiophylla* ni de *P. pseudostrobus*. La respuesta en crecimiento al movimiento experimental se adecua al de un modelo de regresión cuadrática; el crecimiento disminuye conforme las poblaciones se alejan del lugar donde se originan.

## INTRODUCCIÓN

Adicionalmente a las múltiples dificultades a las que se enfrentan los esfuerzos de reforestación (Sáenz-Romero *et al.*, 2004), el cambio climático representa un reto más para acoplar los genotipos a los ambientes de los sitios que se desea reforestar. Se estima que para el año 2030, en México habrá un aumento en la temperatura promedio anual (comparado al promedio 1961-1990) de 1.5°C, y una disminución de precipitación del 7 % (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Ello significará un desacoplamiento entre las poblaciones de especies forestales y el clima imperante, pues las poblaciones ya no coincidirán con el clima para el cual están adaptadas. Esto inducirá un gradual decaimiento de las poblaciones, particularmente en los límites inferiores de su distribución altitudinal natural, tal como ya está ocurriendo en otras partes del mundo (Breshears *et al.*, 2005; Jump *et al.*, 2006; Peñuelas *et al.*, 2007; Rehfeldt *et al.*, 2009; Allen *et al.*, 2010). Este decaimiento causará una disminución de la productividad forestal, y posteriormente un severo deterioro de la cubierta forestal.

Ante este panorama se ha incrementado el interés en conocer como se modifican las respuestas en crecimiento y producción de los bosques ante los cambios ambientales. Idealmente, estas respuestas se obtendrían de experimentos a largo plazo, específicamente diseñados para este fin. Sin embargo, la necesidad de respuestas es inmediata. En el sector forestal, los ensayos de procedencias nos proveen de información de cómo se desempeñan las poblaciones en distintos ambientes (Mátyás, 1994). En estos estudios, se colecta semilla de poblaciones naturales, y se plantan en arreglo experimental en jardines comunes en diferentes sitios. De esta manera, las fuentes de semilla que se han adaptado a su clima local, son evaluadas en un clima diferente. El cambio en las condiciones ambientales, del lugar de origen al lugar de plantación, puede ser considerado como un cambio climático experimental (Leites *et al.*, 2012), y se puede cuantificar como la diferencia en una o varias variables climáticas, entre el clima del sitio de origen y el de plantación. A esto se le ha denominado la distancia de transferencia climática (Rehfeldt *et al.*, 2003).

El uso de distancias de transferencia con el objetivo de entender los efectos del cambio climático es reciente (Mátyás, 1994, 1996; Schmidting, 1994; Carter, 1996;

Rehfeldt *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2006; Thomson and Parker 2008; Thomson *et al.*, 2009). En algunos de estos estudios, el efecto del cambio climático ha sido estudiado plantando una serie de poblaciones en sitios climáticamente distintos a su ambiente natural, para caracterizar la respuesta de una especie (Schmidtling 1994; Carter 1996; Rehfeldt *et al.*, 1999). Este enfoque provee del suficiente número de distancias de transferencia para poder realizar un análisis robusto, incluso cuando los sitios de prueba son pocos, y genera un buen modelo a nivel de especie.

La comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (NSJP), Michoacán, es una comunidad con una notable organización, perteneciente al grupo étnico de los Purépechas. Realizan manejo sustentable en aproximadamente 11,000 ha. de bosque de pino y encino, bajo un régimen de propiedad comunitaria (Velázquez-Montes *et al.*, 2003). Gran parte de sus bosques están dominados por especies como *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* (también conocido como *P. michoacana*), *P. leiophylla*, *P. montezumae* y *Abies religiosa* (Medina-García *et al.*, 2000). Como en la mayoría de las especies forestales, los patrones de distribución y diferenciación de estas especies y sus poblaciones, están determinados por las condiciones ambientales de la región, y las diferentes presiones de selección que éstas imponen (Viveros-Viveros *et al.*, 2005; Viveros-Viveros *et al.*, 2009; Sáenz-Romero *et al.*, 2012).

Previendo un eventual decaimiento en la producción debido al cambio climático, la Dirección Técnica Forestal de la Comunidad Indígena de NSJP (DTF-NSJP), está considerando algunas opciones de manejo para adaptarse al cambio climático, como la migración asistida. La mayor preocupación de la DTF-NSJP es el posible decaimiento de los rodales de *Pinus pseudostrobus*. Sáenz-Romero *et al.*, (2012), delimitaron tres zonas altitudinales de 300 m de amplitud para regular el movimiento de semilla de *P. pseudostrobus* en la región, con lineamientos específicos para adaptarse al clima del año 2030, consistentes en realizar una migración asistida de 300 m hacia arriba en el gradiente altitudinal. Sin embargo, esto significaría que la parte baja de la distribución de *Pinus pseudostrobus* (entre 2200 y 2400 m), quedaría libre para una especie que tolere mejor las altas temperaturas. El candidato natural serían las poblaciones de media a elevada altitud de *P. devoniana* (el intervalo altitudinal de la especie en la región es de 1650 a 2300 m). Sin embargo, la DTF-NSJP desea tener una valoración

de cuánto cambia la respuesta en crecimiento al implementar estas medidas de adaptación, migrar las poblaciones de *P. pseudostrobus* hacia arriba y suplir las poblaciones de la parte baja de *P. pseudostrobus* con *P. devoniana*.

Por lo anterior, en el presente trabajo se planteó coleccionar diferentes procedencias de *P. pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*, distribuidas a lo largo del gradiente altitudinal de la región de NSJP, comenzando desde el límite superior de distribución de las especies. Dichas procedencias se establecieron en ensayos de especies-procedencias a diferentes altitudes, como manera de evaluar el desempeño de las especies a las diferentes condiciones ambientales en el gradiente altitudinal, y de esta manera establecer lineamientos que permitan migrar a las nuevas poblaciones altitudinalmente, con el fin de prevenir los efectos negativos de una baja adaptación a un futuro escenario de calentamiento global.

## **METODOLOGIA**

Se coleccionaron conos de cuatro poblaciones de *Pinus pseudostrobus* y de *P. leiophylla* y cinco poblaciones de *P. devoniana*, a lo largo de un transecto altitudinal, a intervalos (en todos los casos excepto en una población) de 100 m de diferencia altitudinal, desde los 2520 m (cercano al límite superior de distribución en la región de *P. leiophylla* en NSJP y parte media de la distribución de *P. pseudostrobus*), hasta los 1650 m (límite inferior de la distribución de *P. devoniana*) (Cuadro 1). El diseño del muestreo obedece a la intención de incluir la variación contenida en el rango de distribución altitudinal de *P. leiophylla* y de *P. devoniana*, que en una eventual migración asistida, tendrían que reemplazar a las poblaciones del límite altitudinal inferior de *P. pseudostrobus*. Durante la colecta de *P. devoniana*, entre el sitio de 2034 m de altitud y el de 1650, no fue posible coleccionar poblaciones de esta especie, ya que las mismas han sido eliminadas o seriamente fragmentadas (con una densidad severamente disminuida), para establecer huertas de aguacate (*Persea americana*).

Todos los sitios tuvieron la misma exposición (sureste). En cada sitio, se coleccionaron cinco conos con semilla de polinización abierta de cada uno de 11 árboles

de cada población y de cada especie. Las plántulas germinadas de la semilla colectada se crecieron durante 6 meses en una casa de sombra (35%), en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Morelia (CIEco-UNAM), para su posterior establecimiento en campo.

Cuadro 1. Sitios de colecta de las poblaciones de *Pinus devoniana*, *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus* en la región de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México, relación con su rango altitudinal de distribución, y ubicación de los sitios de ensayo en campo.

| Población | Latitud (N)   | Longitud (O)   | Altitud (m) | Especie de <i>Pinus</i> colectada                                      |
|-----------|---------------|----------------|-------------|--|
| 1         | 19° 27' 34.4" | 102° 11' 43.6" | 2520        | <i>pseudostrobus</i> (M)   |
| 2         | 19° 26' 50.1" | 102° 11' 00.5" | 2422        | <i>pseudostrobus</i> (M), <i>leiophylla</i> (LS)                       |
| 3         | 19° 26' 24.6" | 102° 10' 29.6" | 2310        | <i>pseudostrobus</i> (I), <i>leiophylla</i> (M), <i>Devoniana</i> (LS) |
| 4         | 19° 26' 05.1" | 102° 10' 08.3" | 2217        | <i>pseudostrobus</i> (LI), <i>leiophylla</i> (M), <i>devoniana</i> (S) |
| 5         | 19° 25' 42.1" | 102° 09' 34.6" | 2110        | <i>leiophylla</i> (LI), <i>devoniana</i> (M)                           |
| 6         | 19° 25' 28.9" | 102° 08' 57.8" | 2034        | <i>devoniana</i> (M)   |
| 7         | 19° 23' 03.9" | 102° 04' 47.4" | 1650        | <i>devoniana</i> (LI)  |
| Sitio     |               |                |             | Paraje   |
| 1         | 19° 28' 15.6" | 102° 10' 40.8" | 2746        | Cerro de Pario   |
| 2         | 19° 26' 50.1" | 102° 11' 00.5" | 2422        | La Pila  |
| 3         | 19° 25' 42.1" | 102° 09' 34.6" | 2110        | El Rosario   |

Región que ocupa la población dentro del rango altitudinal natural de la especie: LS = límite superior, S = región superior, M = región media, I = región inferior, LI = límite inferior

Para establecer los ensayos de campo, se seleccionaron 3 sitios con una separación de 300 m de diferencia altitudinal entre cada sitio (2100, 2400 y 2700 m). Esto de acuerdo a lo sugerido por Sáenz-Romero *et al.*, (2012), de usar como recomendación general migrar 300 m de altitud hacia arriba, como medida de adaptación al cambio climático que se estima se dará para el año 2030.



El sitio a 2100 m nos permite valorar la respuesta de *Pinus devoniana* y *P. leiophylla* dentro de su rango natural de distribución. Este sitio también hace que las poblaciones de *P. pseudostrobus* salgan de su rango natural de distribución hacia sitios más calientes a menor altitud, y en cierta manera sufran un calentamiento global experimental, lo que nos permitiría evaluar su respuesta en condiciones similares a las predichas para el año 2030. El sitio a 2400 m nos permite ver la respuesta de *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla* dentro de su rango natural de distribución, y desplaza a las poblaciones de *P. devoniana* altitudinalmente hacia arriba, hacia el rango de estas dos últimas especies. Es en este sitio donde se cree que las poblaciones de *P. devoniana* pudieran reemplazar a las poblaciones de *P. pseudostrobus*. El sitio a 2700 m, nos permite ver la respuesta de algunas poblaciones de *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla*, a una altitud a la cual se estima será necesario migrar para adaptarse al clima del año 2030. Para *P. devoniana*, provee de una idea de cómo puede ser la respuesta a una migración asistida radical, realizada en estos momentos, buscando adaptarse a un clima futuro más allá del año 2030.

Se buscó que la apertura del dosel en todos los sitios fuera similar. Se eliminaron algunos árboles del sitio a 2700 m y se podaron algunos del sitio a 2100 m, para hacer la apertura del dosel similar a la del sitio a 2400 m.

Debido a que el suelo de cada sitio seleccionado tiene una historia diferente en cuanto a origen, manejo, perturbación y otras características asociadas, las cuales no necesariamente siguen un gradiente altitudinal, y potencialmente entran en conflicto con el objetivo principal de medir la respuesta exclusivamente a las condiciones ambientales, se establecieron en cada sitio varias camas elevadas de crecimiento. Estas consisten en marcos de madera con medidas de 7.8 m de longitud, 1.5 m de ancho, y 60cm de altura. Todas las camas de crecimiento fueron llenadas con una mezcla de dos tipos de sustrato. El primer componente de la mezcla (66% de la mezcla total), fue tierra proveniente del sitio a 2400 m de altitud, el cual es representativo del bosque local de pino. De acuerdo a Siebe *et al.*, (2003), estos suelos, de tipo andosol, se desarrollaron en el Holoceno a partir de depósitos de cenizas volcánicas. Contienen además, las cenizas más recientes del Parícutín. Se caracterizan por ser fisiológicamente profundos, presentan una buena penetrabilidad de raíces en todos sus

horizontes, están bien drenados y tienen una alta capacidad de aireación. Para el segundo tipo de sustrato (33% de la mezcla total) se usó tierra de monte, un sustrato originado en terrenos forestales por la acumulación y descomposición de material orgánico y mineral, que se caracteriza por una elevada proporción de mantillo, alta actividad biótica y riqueza de nutrientes (SEMARNAT, 1996).

A los 6 meses de edad, las plántulas se establecieron en campo. Una vez establecido el ensayo, se evaluó el porcentaje de sobrevivencia mensual, altura inicial (6 meses de edad) y final (18 meses de edad), crecimiento neto en altura (cm), crecimiento relativo respecto a altura inicial (%), y peso seco final de tallo, ramas, acículas y raíz (g). Para evaluar el peso seco, se recolectó la planta, separando cada uno de sus componentes, y secándolos en un horno (Feliza, México) a 60° C, durante 72 h.

Para determinar diferencias significativas entre los diferentes factores, se realizaron análisis de varianza usando Proc GLM (SAS, 2004), con el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijklm} = \mu + S_i + B_j(S_i) + T_k + P_l(T_k) + S_i * T_k + S_i * P_l(T_k) + T_k * B_j(S_i) + P_l(T_k) * B_j(S_i) + E_{ijklm}$$

donde:

$Y_{ijklm}$  = es la observación del  $m$ -ésimo individuo de la  $l$ -ésima población dentro de la  $k$ -ésima especie en el  $j$ -ésimo bloque dentro del  $i$ -ésimo sitio

$\mu$  = es la media general de la población

$S_i$  = es el efecto del  $i$ -ésimo sitio

$B_j(S_i)$  = es el efecto del  $j$ -ésimo bloque dentro del  $i$ -ésimo sitio

$T_k$  = es el efecto de la  $k$ -ésima especie

$P_l(T_k)$  = es el efecto de la  $l$ -ésima población dentro de la  $k$ -ésima especie

$S_i * T_k$  = es el efecto de la interacción de la  $k$ -ésima especie con el  $i$ -ésimo sitio.

$S_i * P_l(T_k)$  = es el efecto de la interacción de la  $l$ -ésima población con el  $i$ -ésimo sitio.

$T_k * B_j(S_i)$  = es el efecto de la interacción de la  $k$ -ésima especie con el  $j$ -ésimo bloque

$P_l(T_k) * B_j(S_i)$  = es el efecto de la interacción de la  $l$ -ésima población con el  $j$ -ésimo bloque

$E_{ijklm}$  = es el efecto residual

Adicionalmente, se realizó un análisis de varianza separado para cada especie, usando una simplificación del modelo estadístico anterior, donde no se incluyó el efecto de la especie ( $T_k$ ), y las respectivas interacciones.

Así mismo, para determinar que patrón sigue la respuesta en crecimiento de las especies ante el movimiento experimental, el cual puede ser considerado como un cambio climático experimental, se realizaron análisis de regresión entre el crecimiento relativo y el movimiento experimental, expresado como la distancia de transferencia, la cual se obtuvo de la diferencia entre el sitio de establecimiento y el sitio de origen (distancia de transferencia = altitud del sitio experimental – altitud de origen de la población). Una distancia de transferencia positiva significa que la población subió en el gradiente altitudinal, mientras que una distancia de transferencia negativa significa que la población bajó en el gradiente altitudinal.

Para determinar si existen diferencias entre especies, en la forma de su respuesta en crecimiento relativo ante el movimiento experimental, se realizó un análisis de covarianza (ANCOVA) con Proc GLM (SAS), con el índice de transferencias como covariable. En este caso, el ANCOVA se usa para comparar los modelos de regresión, al probar el efecto de una variable categórica (especie) en una variable dependiente (crecimiento relativo, “y”), mientras, al mismo tiempo, se controla el efecto de una covariable continua (distancia de transferencia, “x”). Al comparar dos o más curvas de regresión, la variable categórica separa la relación entre “x” y “y” en varias curvas, una para cada nivel (especie). Los modelos de regresión se comparan al observar la interacción de la variable categórica con la variable independiente continua (“x”), o covariable. Si la interacción es significativa, esto quiere decir que el efecto de la covariable continúa en la variable de respuesta (“y”), depende del nivel de la variable categórica. En otras palabras, las curvas tienen formas diferentes (Crawley, 2007).

## **RESULTADOS**

### **Sobrevivencia**

En general, y contrario a lo esperado, se tuvieron muy buenos resultados en cuanto a sobrevivencia para las tres especies en los tres sitios de ensayo. En promedio entre los tres sitios, *Pinus pseudostrobus* tuvo un 99.7% de sobrevivencia, mientras que *P. devoniana* y *P. leiophylla* tuvieron un porcentaje del 98%. Sin embargo, estos resultados deben tomarse con cautela, puesto que durante la época seca (diciembre a mayo), que es cuando usualmente ocurre la mayoría de las muertes debido al estrés por sequía, ocurrieron lluvias atípicas (en el mes de febrero), las cuales muy probablemente ayudaron a que no se presentara estrés por sequía aparente. En las pocas muertes ocurridas, no se encontró algún patrón significativo respecto a la altitud del sitio de plantación, como pudiera ser daño por heladas, o daño por sequía. Al parecer, las pocas muertes ocurridas fueron eventos aleatorios, producto de que algunos individuos no superaron el estrés del trasplante. Estos resultados indican que en cuanto a sobrevivencia, para las tres especies, al menos bajo las condiciones climáticas del año evaluado, la migración asistida es una alternativa viable de manejo. Estos resultados sugieren que se pueden reforestar sitios con la especie y poblaciones necesarias para el clima del año 2030, sin que el clima actual cause grandes daños en la sobrevivencia, debido a las heladas.

### **Altura de planta, crecimiento y peso seco: análisis general**

En el análisis de varianza realizado inmediatamente después del establecimiento del experimento (agosto 2011, 6 meses de edad), no se encontraron diferencias en altura de planta entre sitios, pero si entre especies y para el caso de *Pinus devoniana*, se encontraron diferencias significativas entre poblaciones. Esto es una prueba de que las plantas se distribuyeron de manera aleatoria y equitativa entre los 3 sitios. También es un indicador de que las poblaciones de *Pinus devoniana*, las únicas que mostraron

diferencias en vivero y debido a las cuales se deben las diferencias observadas, llegaron a la etapa de campo mostrando su inherente variación genética entre poblaciones, en este caso, la población de menor altitud (1650 m) mostró una mayor media de altura de plantas.

En el análisis de varianza realizado a los 18 meses (agosto de 2012; Cuadro 2), sí se encontraron diferencias entre sitios para altura de planta, crecimiento neto (Figura 1), crecimiento relativo y peso seco, lo que indica que las condiciones ambientales de los sitios sí tuvieron influencia sobre el crecimiento de las plantas. Entre especies se encontraron diferencias para altura de planta, crecimiento neto (Figura 2) y peso seco, pero no para crecimiento relativo (Cuadro 2). A nivel general, para poblaciones dentro de especie, no se encontraron diferencias para las variables altura de planta y peso seco, y sólo se encontraron diferencias para las variables crecimiento neto y crecimiento relativo (Cuadro 2).

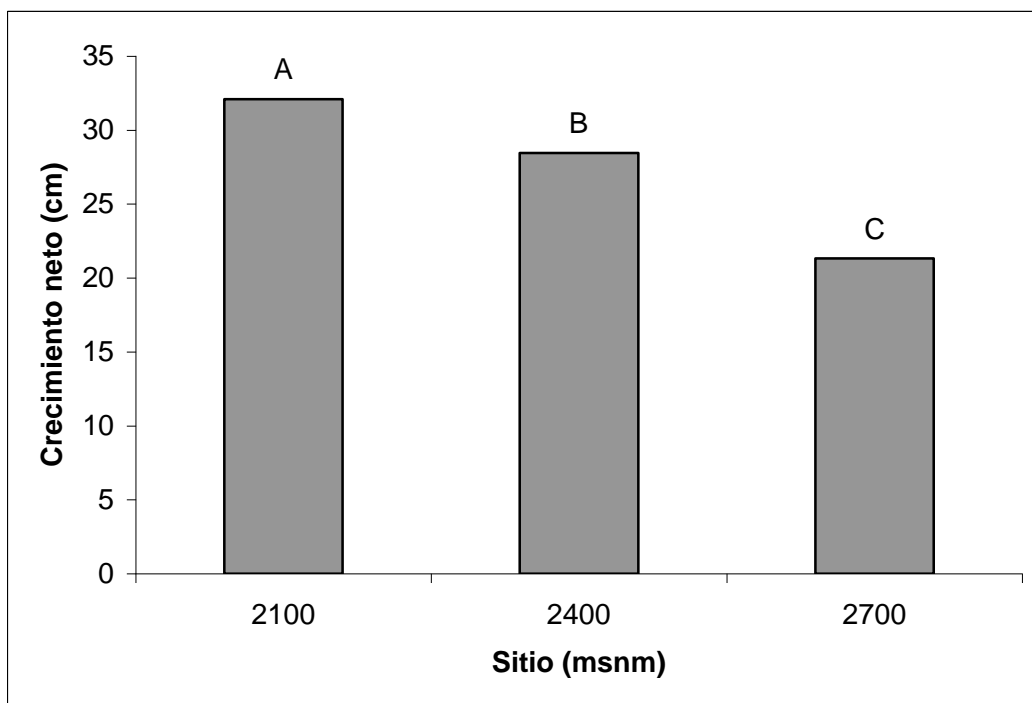


Figura 1. Crecimiento neto promediando las tres especie en cada uno de los sitios. Las letras denotan las diferencias de acuerdo a la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

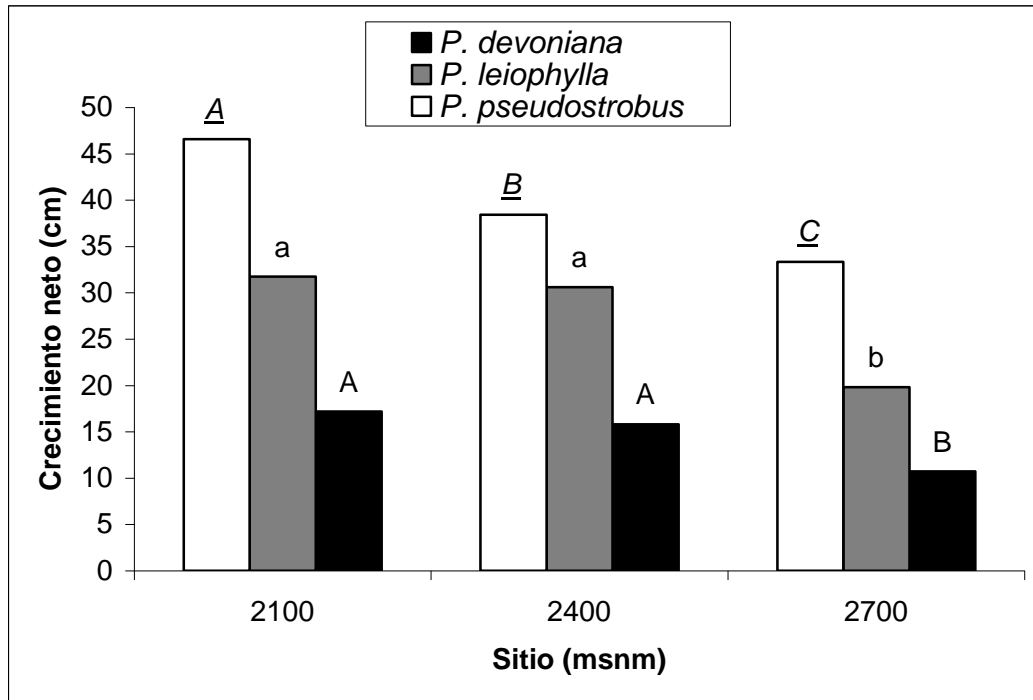


Figura 2. Crecimiento neto de cada una de las especies en cada uno de los sitios. Las letras denotan las agrupaciones comparando sitios dentro de cada especie de acuerdo a la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

Debido a que cada especie tiene patrones diferentes de variación genética, se realizaron ANOVAS individuales por especie.

### Altura de planta, crecimiento y peso seco: análisis por especie

Para *Pinus devoniana*, se encontraron diferencias entre sitios para todas las variables (cuadro 3). Entre poblaciones se encontraron diferencias en crecimiento neto y crecimiento relativo, pero no en altura de planta y peso seco. La falta de diferencias significativas en altura de planta, aparentemente se debe a que si bien la población de menor altitud mostró una mayor altura media de planta (al término de la etapa de vivero y el inicio de la de campo), durante la etapa de campo acumuló un menor crecimiento en comparación con las poblaciones de mayor altitud, probablemente debido a una desadaptación a una altitud más elevada que los sitios de su distribución natural. Esto generó la oportunidad de que las poblaciones de mayor altitud igualaran en altura a la

población de menor altitud, y de esta manera, desaparecieran las diferencias significativas.

Para *Pinus leiophylla* y *P. pseudostrobus*, sólo se encontraron diferencias entre sitios para las variables de crecimiento, y no se encontraron diferencias significativas entre poblaciones.

Cuadro 2. Porcentaje de contribución a la varianza total (%), y significancia (P) del análisis de varianza en conjunto de los tres sitios, las tres especies y sus poblaciones, para las variables de crecimiento y peso seco.

| F.V.                     | G.L. | Altura de planta |        |                  |        |                      |        | Peso seco |        |             |        |                     |        |       |        |
|--------------------------|------|------------------|--------|------------------|--------|----------------------|--------|-----------|--------|-------------|--------|---------------------|--------|-------|--------|
|                          |      | Altura 18 meses  |        | Crecimiento neto |        | Crecimiento Relativo |        | Raíz      |        | Parte Aérea |        | Relación Aérea/Raíz |        | Total |        |
|                          |      | %                | P      | %                | P      | %                    | P      | %         | P      | %           | P      | %                   | P      | %     | P      |
| Sitio                    | 2    | 6                | 0.0028 | 9                | 0.0001 | 6                    | 0.0179 | 31        | 0.0001 | 26          | 0.0002 | 5                   | 0.1322 | 29    | 0.0001 |
| Bloque (Sitio)           | 15   | 4                | 0.0007 | 2                | 0.0049 | 5                    | 0.0191 | 9         | 0.0003 | 8           | 0.0008 | 17                  | <.0001 | 8     | 0.0005 |
| Especie                  | 2    | 64               | <.0001 | 51               | <.0001 | 0                    | 0.3859 | 0         | 0.0999 | 7           | 0.001  | 15                  | <.0001 | 4     | 0.0024 |
| Procedencia (Especie)    | 9    | 0                | 0.0741 | 3                | <.0001 | 19                   | <.0001 | 0         | 0.2571 | 0           | 0.8086 | 0                   | 0.7897 | 0     | 0.7469 |
| Sitio*Especie            | 4    | 1                | 0.0329 | 2                | 0.0144 | 0                    | 0.4966 | 3         | 0.0509 | 2           | 0.1031 | 0                   | 0.388  | 3     | 0.0734 |
| Especie*Bloq(Sitio)      | 30   | 0                | <.0001 | 0                | 0.0133 | 0                    | 0.5133 | 1         | 0.1386 | 1           | 0.303  | 5                   | 0.029  | 1     | 0.335  |
| Sitio*Proc(Especie)      | 18   | 2                | 0.1727 | 1                | 0.2847 | 5                    | 0.004  | 0         | 0.4441 | 0           | 0.2721 | 1                   | 0.1321 | 0     | 0.3334 |
| Bloq*Proc(Sitio*Especie) | 135  | 1                | 0.1725 | 1                | 0.0983 | 7                    | <.0001 | 0         | 0.9127 | 4           | 0.177  | 6                   | 0.0888 | 2     | 0.3545 |
| Error                    | 811  | 22               |        | 31               |        | 58                   |        | 56        |        | 52          |        | 51                  |        | 53    |        |

Cuadro 3. Porcentaje de contribución a la varianza total (%), y significancia (P) del análisis de varianza de *P. devoniana*, para las variables de crecimiento y peso seco.

| F.V.             | G.L. | Altura de planta |        |                  |        |                      |        | Peso seco |        |             |        |                     |        |       |        |
|------------------|------|------------------|--------|------------------|--------|----------------------|--------|-----------|--------|-------------|--------|---------------------|--------|-------|--------|
|                  |      | Altura 18 meses  |        | Crecimiento neto |        | Crecimiento Relativo |        | Raíz      |        | Parte Aérea |        | Relación Aérea/Raíz |        | Total |        |
|                  |      | %                | P      | %                | P      | %                    | P      | %         | P      | %           | P      | %                   | P      | %     | P      |
| Sitio            | 2    | 8                | 0.0323 | 9                | 0.0251 | 7                    | 0.0331 | 20        | 0.0119 | 19          | 0.0412 | 0                   | 0.5645 | 22    | 0.0241 |
| Bloque (Sitio)   | 15   | 3                | 0.2147 | 3                | 0.0519 | 3                    | 0.0319 | 16        | 0.0013 | 11          | 0.0128 | 33                  | <.0001 | 9     | 0.0145 |
| Procedencia      | 3    | 2                | 0.1454 | 26               | 0.0024 | 33                   | 0.0011 | 0         | 0.0616 | 7           | 0.6955 | 0                   | 0.7049 | 6     | 0.6821 |
| Sitio*Proc       | 6    | 0                | 0.3344 | 2                | 0.0814 | 2                    | 0.0575 | 2         | 0.7664 | 0           | 0.0233 | 0                   | 0.3675 | 0     | 0.0294 |
| Proc*Bloq(Sitio) | 45   | 5                | 0.091  | 3                | 0.148  | 1                    | 0.3364 | 0         | 0.6356 | 0           | 0.4849 | 14                  | 0.0503 | 0     | 0.6425 |
| Error            | 261  | 82               |        | 57               |        | 54                   |        | 62        |        | 63          |        | 53                  |        | 63    |        |



Cuadro 4. Porcentaje de contribución a la varianza total (%), y significancia (P) del análisis de varianza de *P. leiophylla*, para las variables de crecimiento y peso seco.

| F.V.             | G.L. | Altura de planta |        |                  |        |                      |        | Peso seco |        |             |        |                     |        |       |        |
|------------------|------|------------------|--------|------------------|--------|----------------------|--------|-----------|--------|-------------|--------|---------------------|--------|-------|--------|
|                  |      | Altura 18 meses  |        | Crecimiento neto |        | Crecimiento Relativo |        | Raíz      |        | Parte Aérea |        | Relación Aérea/Raíz |        | Total |        |
|                  |      | %                | P      | %                | P      | %                    | P      | %         | P      | %           | P      | %                   | P      | %     | P      |
| Sitio            | 2    | 24               | 0.0097 | 32               | 0.0002 | 1                    | 0.2745 | 23        | 0.0144 | 26          | 0.004  | 0                   | 0.4757 | 27    | 0.004  |
| Bloque (Sitio)   | 15   | 22               | <.0001 | 4                | 0.0437 | 21                   | 0.0014 | 14        | 0.0009 | 12          | 0.0009 | 27                  | 0.0002 | 12    | 0.0009 |
| Procedencia      | 3    | 0                | 0.4642 | 0                | 0.7146 | 0                    | 0.2057 | 0         | 0.8719 | 0           | 0.7205 | 7                   | 0.9923 | 0     | 0.7324 |
| Sitio*Proc       | 6    | 1                | 0.1692 | 0                | 0.5806 | 0                    | 0.9865 | 0         | 0.1288 | 0           | 0.4506 | 0                   | 0.0113 | 0     | 0.3927 |
| Proc*Bloq(Sitio) | 45   | 1                | 0.3732 | 3                | 0.0991 | 19                   | <.0001 | 0         | 0.8409 | 0           | 0.9513 | 11                  | 0.1041 | 0     | 0.9503 |
| Error            | 277  | 52               |        | 61               |        | 60                   |        | 63        |        | 62          |        | 55                  |        | 61    |        |

Cuadro 5. Porcentaje de contribución a la varianza total (%), y significancia (P) del análisis de varianza de *P. pseudostrobus*, para las variables de crecimiento y peso seco.

| F.V.             | G.L. | Altura de planta |        |                  |        |                      |        | Peso seco |        |             |        |                     |        |       |        |
|------------------|------|------------------|--------|------------------|--------|----------------------|--------|-----------|--------|-------------|--------|---------------------|--------|-------|--------|
|                  |      | Altura 18 meses  |        | Crecimiento neto |        | Crecimiento Relativo |        | Raíz      |        | Parte Aérea |        | Relación Aérea/Raíz |        | Total |        |
|                  |      | %                | P      | %                | P      | %                    | P      | %         | P      | %           | P      | %                   | P      | %     | P      |
| Sitio            | 2    | 19               | 0.0076 | 21               | 0.0029 | 7                    | 0.0755 | 55        | 0.0009 | 41          | 0.003  | 22                  | 0.0099 | 45    | 0.0023 |
| Bloque (Sitio)   | 15   | 18               | <.0001 | 13               | <.0001 | 19                   | <.0001 | 3         | 0.1013 | 7           | 0.1019 | 11                  | 0.0054 | 6     | 0.1056 |
| Procedencia      | 3    | 2                | 0.1117 | 2                | 0.0998 | 0                    | 0.3774 | 0         | 0.0112 | 0           | 0.4716 | 0                   | 0.3079 | 0     | 0.3086 |
| Sitio*Proc       | 6    | 0                | 0.2951 | 0                | 0.4244 | 0                    | 0.7489 | 1         | 0.9606 | 0           | 0.8904 | 1                   | 0.3284 | 0     | 0.9131 |
| Proc*Bloq(Sitio) | 45   | 1                | 0.3576 | 1                | 0.3638 | 0                    | 0.3095 | 0         | 0.7694 | 16          | 0.0027 | 0                   | 0.7329 | 13    | 0.006  |
| Error            | 273  | 60               |        | 63               |        | 74                   |        | 41        |        | 36          |        | 66                  |        | 36    |        |

## Respuesta general en crecimiento ante el movimiento altitudinal experimental

Para las tres especies, la respuesta en crecimiento relativo al movimiento altitudinal experimental, se ajusta a un modelo de regresión cuadrática (Figura 3), esto concuerda con la hipótesis del límite de tolerancia genética, la cual establece, que el desempeño de una población declinará conforme se aleje de las condiciones a las cuales este adaptada (Mátyás *et al.*, 2010). Aún cuando la variabilidad genética inherente de cada población permite ciertos ajustes ante las nuevas presiones de selección, cuando se alcanza el límite de tolerancia genético y fisiológico, la respuesta en crecimiento disminuye. En este caso, cuando las poblaciones se mueven hacia sitios más calientes o más fríos, en comparación con su origen, su crecimiento disminuye. Respuestas similares se han observado en *Pinus taeda*, *Picea abies* (Schmidtling, 1994), y varias especies del genero *Larix* (Rehfeldt *et al.*, 1999).

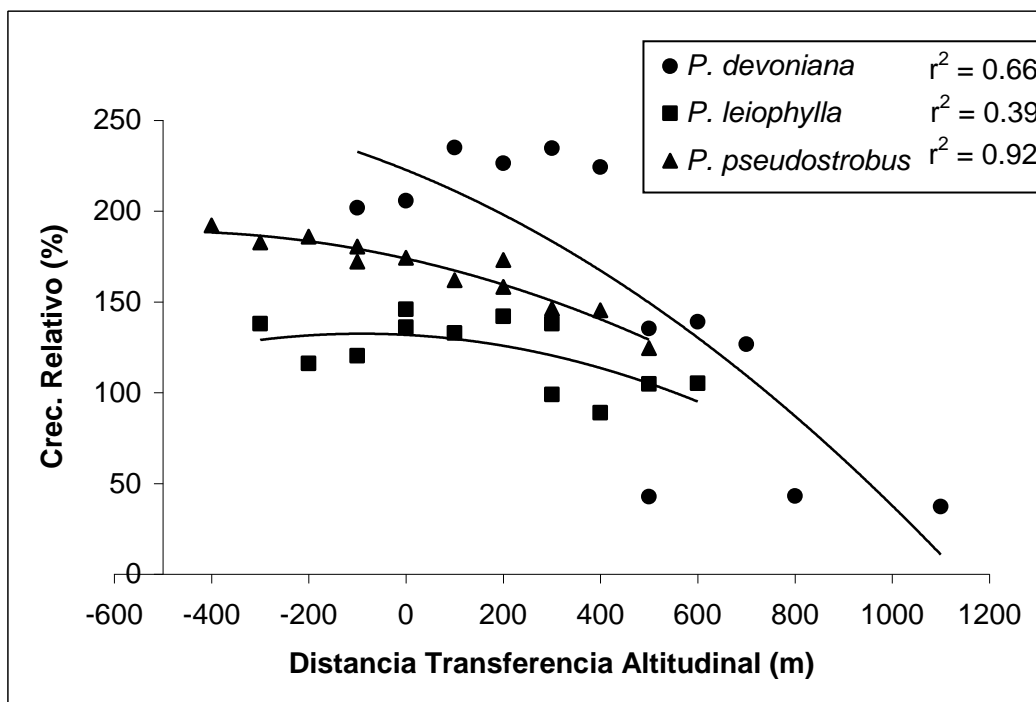


Figura 3. Respuesta en crecimiento de las tres especies en relación al índice de transferencia altitudinal El ajuste del modelo regresión para *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* es significativo ( $P \leq 0.05$ ), y para *P. leiophylla* ( $P = 0.1033$ ).

En el análisis de covarianza, se encontró que la interacción entre la variable categórica (especie) y la variable independiente continua ("x"), o covariable, es significativa (g.l.=2, F=3.23, P=0.04), indicando que existen diferencias en la manera en que las especies responden al movimiento altitudinal experimental. Lo más probable es que esta diferencia se deba a la población de menor altitud de *Pinus devoniana*, la cual sufre movimientos altitudinales de gran magnitud, de hasta 1100m hacia arriba en el gradiente. Pero más importante, esta población se origina en una zona con características climáticas diferentes a las de las zonas a las cuales fue migrada, proviniendo de una zona más cálida, con una temperatura media anual de 17.9° C, mientras que la temperatura media anual del sitio 3, el de menor altitud, y por lo tanto el más cálido de los 3 establecidos, es de 15.5° C, lo que significa que esta población se movió a una zona aproximadamente 2.4° C más fría (Datos climáticos estimados con un modelos "spline" disponible en [forest.moscowfl.wsu.edu/climate/](http://forest.moscowfl.wsu.edu/climate/)). Por el contrario, las poblaciones de la parte alta de distribución de *P. devoniana*, y todas las poblaciones de *P. leiophylla* y *P. pseudostrobus* estudiadas, y los sitios de ensayo, se encuentran en un rango de temperaturas medias anuales que van desde 15.8° C hasta 14.3° C, por lo que la diferencia en temperatura entre el sitio de colecta y los sitios de ensayo, no es tan drástica. Se ha demostrado que existen diferencias en la respuesta de las poblaciones, influyendo no sólo el movimiento que sufren, sino también, y más importante, el tipo de zona en que se originan (zona muy fría, zona fría, y zona calida), y la zona a la que se mueven. Por ejemplo, las poblaciones de sitios cálidos que se mueven a sitios sólo ligeramente más fríos, ven muy disminuida su respuesta en crecimiento, al contrario de poblaciones originadas en sitios fríos o muy fríos, las cuales se pueden mover en mayor magnitud a sitios más cálidos, sin afectar su respuesta, incluso mejorándola (Leites *et al.*, 2012).

## Implicaciones para manejo

Como ya se observó, la respuesta de las poblaciones de cada una de las tres especies consiste en que conforme éstas se desplazan en el gradiente altitudinal, y se alejan de las condiciones a las que están adaptadas, disminuye su crecimiento, ya que se alejan de su óptimo ambiental.

Debido a que el interés de la DTF-NSJP es tener una valoración de cuál es la magnitud del cambio en la respuesta en crecimiento al desplazar las poblaciones en el gradiente, decidimos mostrar estos cambios con respecto al óptimo, o lo que es lo mismo, respecto al crecimiento de aquellas poblaciones que no sufrieron desplazamiento altitudinal alguno. Para lograr esto, las poblaciones que no sufrieron movimiento en el gradiente se tomaron como un 100% de crecimiento relativo, y de esta manera, sólo mostrar la ganancia o pérdida en crecimiento relativo, que se tiene al alejarse del ambiente óptimo (figuras 4, 5 y 6)

Para las poblaciones del rango superior de distribución de *Pinus devoniana*, las originadas por encima de los 2000 m de altitud, se obtuvieron respuestas similares en la magnitud del crecimiento cuando las poblaciones estaban creciendo en su sitio de origen, y cuando crecieron en sitios de hasta 400 m hacia arriba en el gradiente altitudinal, lo que abarcaría la expansión hacia la parte inferior del rango de distribución de *P. pseudostrobus* (Figura 4). Sin embargo, una migración asistida más agresiva de estas poblaciones, que implique movimientos hacia arriba en el gradiente superiores a los 500 m, significa que el crecimiento disminuye considerablemente y se tendría una pérdida del 30% en comparación con el óptimo (Figura 4). Para las poblaciones del rango inferior de distribución de *P. devoniana*, las originadas cerca de los 1600 m de altitud, cualquier intento de introducción hacia una zona más fría, implican una pérdida de crecimiento del 80% en comparación con el óptimo, lo que indica una severa desadaptación (Figura 4). Los resultados anteriores apoyan la idea de que mover poblaciones de *P. devoniana*, solamente hacia la distribución inferior de *P.*

*pseudostrobus*, para que gradualmente lo suplan, es una estrategia de manejo viable, puesto que tienen una respuesta aceptable al movimiento a una zona ligeramente más fría.

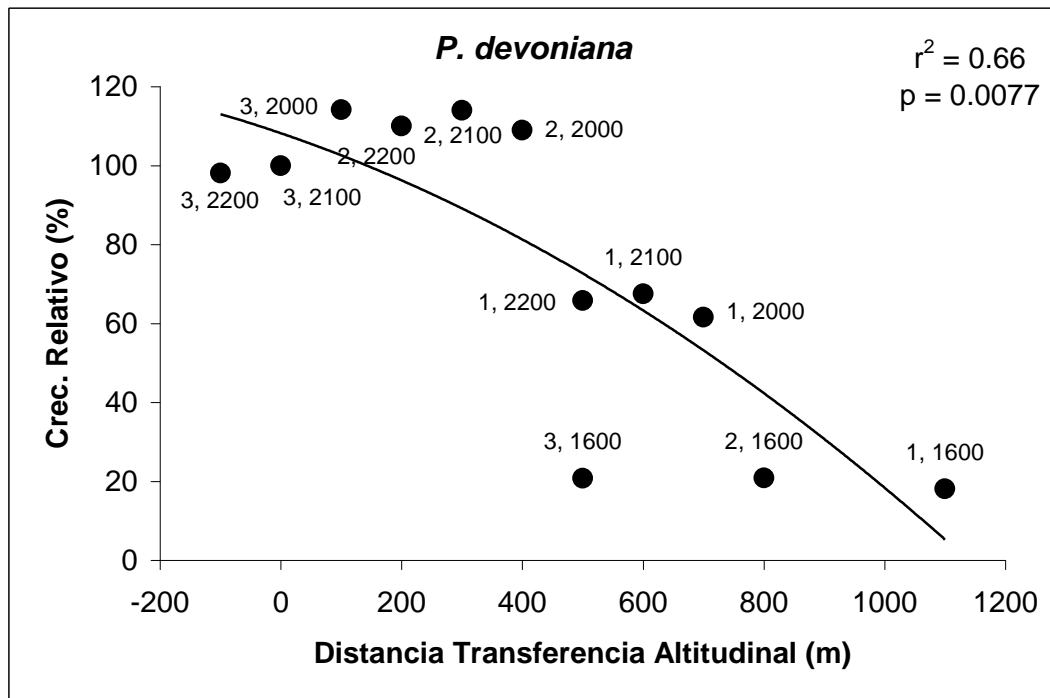


Figura 4. Respuesta en crecimiento de *Pinus devoniana*, ante el movimiento altitudinal experimental. Las etiquetas indican la altitud del sitio en donde se estableció el experimento (1 = 2700m, 2 = 2400m, 3 = 2100m), y la altitud de origen (m).

Debido a que los sitios de plantación de 2100 m y 2400 m están dentro del rango natural de distribución de *Pinus leiophylla*, lo que indica que están cerca de su ambiente óptimo (con óptimo nos referimos al crecimiento de una procedencia en su altitud de origen), la respuesta en crecimiento de sus poblaciones, fue muy similar. Sólo al subir al sitio de 2700 m, y que implica movimientos mayores a los 300m hacia arriba en el gradiente, el crecimiento disminuye un 20% respecto al óptimo. Esto indica que empezar a migrar las poblaciones de *P. leiophylla* en este momento, buscando su adaptación al clima del año 2030, sería una opción viable de manejo, ya que la respuesta en crecimiento no es muy inferior en comparación a la obtenida en el óptimo (Figura 5).

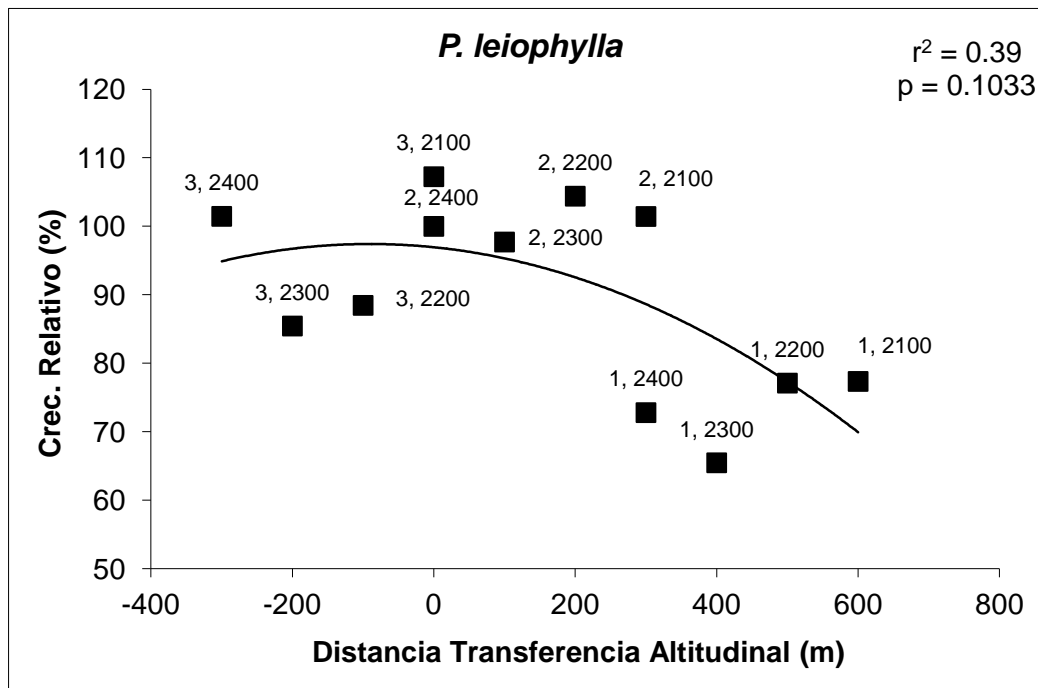


Figura 5. Respuesta en crecimiento de *Pinus leiophylla*, ante el movimiento altitudinal experimental. Las etiquetas indican la altitud del sitio en donde se estableció el experimento (1 = 2700m, 2 = 2400m, 3 = 2100m), y la altitud de origen (m).

Para las poblaciones de *Pinus pseudostrobus*, al bajar 300 m en el gradiente altitudinal, lo que equivale a estar expuesto a un ligero aumento de temperatura, se obtiene una ganancia del 10% respecto al óptimo, aunque la curva de respuesta nos indica que estos aumentos se encuentran en el límite de tolerancia, y cualquier aumento mayor en la temperatura, seguramente cambiará de manera drástica la respuesta, haciéndola disminuir (figura 6). Por el otro lado, aunque existe una disminución de crecimiento con movimientos hacia arriba en el gradiente, esta disminución no es de gran magnitud, entre un 15 y 20 % menor que el óptimo con movimientos de 300 m hacia arriba (figura 6).

En base a esto, podemos asegurar que la migración asistida de las poblaciones de *Pinus pseudostrobus*, buscando su adaptación al clima del año 2030, es una estrategia de manejo que debe empezar a implementarse, puesto que la respuesta en crecimiento no es muy inferior en comparación a la obtenida en el óptimo, y aunque en los primeros años el crecimiento se verá un poco disminuido, a largo plazo, conforme el

clima vaya cambiando y la temperatura aumentado, la respuesta en crecimiento empezará a recuperar sus niveles normales.

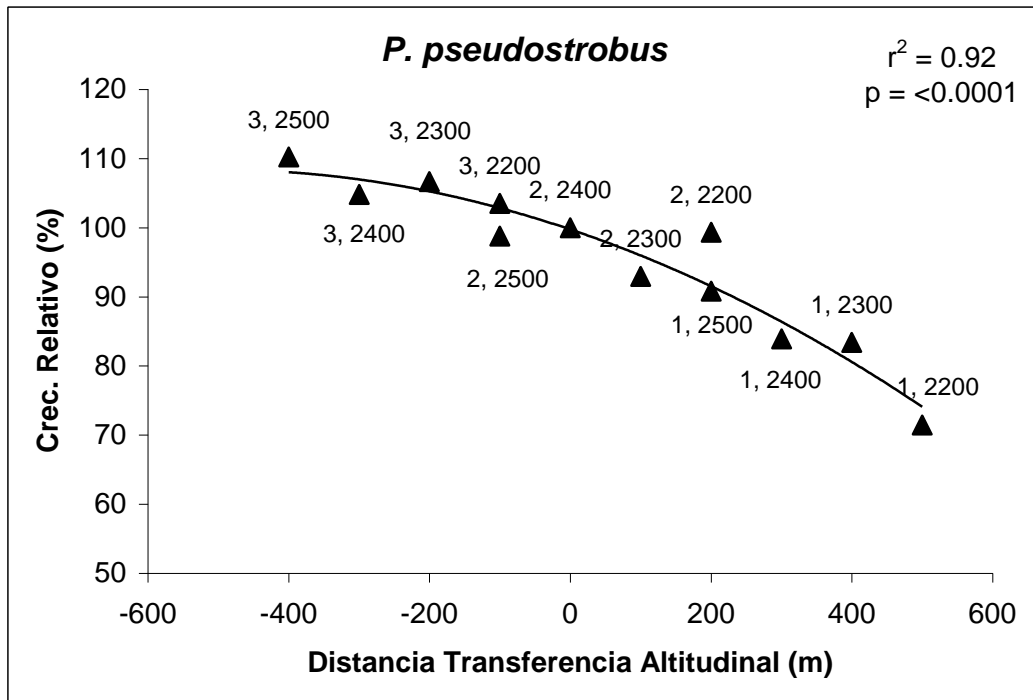


Figura 6. Respuesta en crecimiento de *Pinus pseudostrobus*, ante el movimiento altitudinal experimental. Las etiquetas indican la altitud del sitio en donde se estableció el experimento (1 = 2700m, 2 = 2400m, 3 = 2100m), y la altitud de origen (m).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se encontraron diferencias entre sitios para todas las variables de crecimiento (altura, crecimiento, crecimiento relativo, peso seco). Se encontraron diferencias entre especies para todas las variables de crecimiento, con la excepción de crecimiento relativo. Sólo para las poblaciones de *Pinus devoniana* se encontraron diferencias significativas entre poblaciones en crecimiento y crecimiento relativo, confirmando lo observado en vivero, de que la población de menor altitud es diferente a las de mayor altitud. No se encontraron diferencias significativas entre las poblaciones de *P. leiophylla* ni *P. pseudostrobus*, para ninguna variable, según los resultados del ANOVA.

La respuesta en crecimiento al movimiento experimental, claramente se adecua al de un modelo de regresión cuadrática. El crecimiento de las plantas disminuye conforme éstas se alejan del lugar donde se originan.

Se recomienda empezar a considerar a la migración asistida de poblaciones forestales como una estrategia viable de adaptación al cambio climático. Se obtienen buenos resultados de sobrevivencia, y aunque se tiene una disminución en crecimiento, es algo aceptable, comparado a los riesgos que se tienen al no realizar alguna acción.

## REFERENCIAS

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kizberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259:660–684.
- Breshears, D.D., Cobb, N. S., Rich, P. M., Price, K. P., Allen, C. D., Balice, R. G., Romme, W. H., Kastens, J. H., Floyd, M. L., Belnap, J., Anderson, J. J., Myers, O. B., & Meyer, C. W. (2005). Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 102: 15144-15148.
- Carter, K. K. 1996. Provenance tests as indicators of growth response to climate change in 10 north temperate tree species. *Canadian Journal of Forest Research* 26:1089–1095.
- Crawley, M. J. 2007. *The R Book*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 942 pags.
- Jump A.S., Hunt, J. M., & Peñuelas, J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12:2163-2174.
- Leites, L. P., Robinson, A. P., Rehfeldt, G. E., Marshall, J. D., Crookston, N. L. 2012. Height growth response to climatic changes differs among populations of Douglas-fir : a novel analysis of historic data. *Ecological applications*, 22 (1): 154 – 165.



- Matyas, C. 1994. Modeling climate change effects with provenance test data. *Tree Physiology* 14:797–804.
- Matyas, C. 1996. Climatic adaptation of trees: rediscovering provenance tests. *Euphytica* 92:45–54.
- Mátyás, C., Berki, I., Czúcz, B., Gálos, B., Móricz, N., & Rasztoivits, E. (2010). Future of beech in Southern Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silv.Lign.Hung* 6:91-110.
- Medina-García, C., Guevara-Féfer, F., Martínez-Rodríguez, M. A., Silva-Sáenz, P., Chávez-Carbajal, M. A., & García-Ruiz, I. (2000). Estudio florístico en el área de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Acta botánica Mexicana* 52: 5-41.
- Peñuelas J., Oyaga, R., Boada, M., & Jump, A. S. (2007). Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography* 30:830-838.
- Rehfeldt, G. E., C. C. Ying, D. L. Spittlehouse, and D. A. Hamilton. 1999. Genetic responses to climate in *Pinus contorta*: niche breadth, climate change, and reforestation. *Ecological Monographs* 69:375–407.
- Rehfeldt, G. E., N. M. Tchebakova, L. I. Milyutin, E. I. Parfenova, W. R. Wykoff, and N. A. Kouzmina. 2003. Assessing population responses to climate in *Pinus sylvestris* and *Larix spp.* of Eurasia with climate-transfer models. *Eurasian Journal of Forest Research* 6: 83–98.
- Rehfeldt, G.E., Ferguson, D. E., & Crookston, N. L. (2009). Aspen, climate and sudden decline in western USA. *Forest Ecology and Management* 258:2353-2364.
- Sáenz-Romero, C., Viveros-Viveros, H., & Guzmán-Reyna, R. (2004). Altitudinal genetic variation among *P. oocarpa* populations in Michoacán, western México. Preliminary results from a nursery test. *Forest Genetics* 11 (3-4): 341-349.
- Saenz-Romero, C., Rehfeldt, G.E., Crookston, N.L., Pierre, D., St-Amant, R., Bealieu, J. & Richardson, B. (2010). Contemporary and projected spline climate surfaces for Mexico and their use in understanding climate-plant relationships. *Climatic Change*, 102, 595–623.
- Sáenz-Romero. C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, A., Zamarripa-Morales, V., & López-Upton, J. (2012). Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrabus* populations from Michoacán, México. Two location shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32 (2): 111 – 120.

- SAS Institute. (2004). SAS/STAT Guide for personal computers. Version 9.1. SAS Institute, Cary, N. C. USA. 1028 p.
- Schmidting, R. C. 1994. Use of provenance tests to predict response to climatic change: loblolly pine and Norway spruce. *Tree Physiology* 14:805–817.
- Siebe, C., Bocco, G., Sanchez, J., Velazquez, A. 2003. Suelos: distribución, características y potencial de uso. Capítulo 7 en: Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales. INE-SEMARNAT, Mexico. 603 pags.
- Thomson, A. M., and W. H. Parker. 2008. Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change. 1. Jack pine. *Canadian Journal of Forest Research* 38:157–170.
- Thomson, A. M., C. L. Riddell, and W. H. Parker. 2009. Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change. 2. Black spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 39:143–153.
- Velázquez-Montes, A., Fregoso-Domínguez, A., Bocco-Verdinelli, G. & Cortez-Jaramillo, G. (2003). The use of a landscape approach in Mexican forest indigenous communities to strengthen long-term forest management. *Interciencia* 28 (11): 632-638.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J.J., y López-Upton, J. 2006. Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrabus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2):121-126.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I. : height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257:836-842.
- Wang, T., A. Hamann, A. Yanchuck, G. A. O'Neill, and S. N. Aitken. 2006. Use of response functions in selecting lodgepole pine populations for future climate. *Global Change Biology* 12:2404–2416.

## DISCUSION GENERAL

Los resultados muestran que las poblaciones de *Pinus devoniana* tienen una clara diferenciación genética en los caracteres cuantitativos de crecimiento, a lo largo del gradiente altitudinal. En vivero fue evidente un patrón de crecimiento asociado a la altitud de origen, donde la procedencia de menor altitud mostró mayor crecimiento. Mientras que en campo, esta población de menor altitud, aparentemente al verse sometida a condiciones muy diferentes a las de su origen, mostró su desadaptación, expresándolo como un crecimiento menor al de las poblaciones de mayor altitud.

Considerando los inminentes efectos del cambio climático, es importante que cualquier práctica de manejo implementada tome en consideración estas diferencias genéticas entre las poblaciones de *Pinus devoniana*. Si bien las dos zonas semilleras delineadas anteriormente (Sáenz-Romero y Tapia-Olivares, 2008), se delinearon en función del daño por helada, aparentemente siguen un patrón de variación paralelo a la variación observada en los caracteres de crecimiento en nuestro experimento. La zonificación mencionada sugiere que el movimiento de una población no puede ser mayor al de la amplitud de la zona (400 m altitudinales). Esto queda demostrado en este estudio, ya que cuando una población de *P. devoniana*, independientemente de la zona en la que se origine, se desplaza más de 400 m altitudinales, sufre una considerable desadaptación, expresada como una disminución en su crecimiento. En base a esto, se sugiere que cualquier práctica de migración asistida, debe tomar en consideración las zonificaciones existentes y buscar un equilibrio entre la necesidad de migrar altitudinalmente hacia arriba, y los efectos negativos en la adaptación que tendrá ese movimiento en el presente (daño por heladas y menor crecimiento).

Para las poblaciones de *Pinus leiophylla* y *P. pseudostrobus*, tanto en vivero como en campo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre poblaciones. Si bien la altura de planta suele ser una de las características más directas para evaluar el desempeño de las coníferas, en el caso de *P. leiophylla*, existe la posibilidad de que la respuesta en desempeño a los cambios de altitud pudiera

expresarse en otras características morfológicas, como cambios en la densidad de madera, la longitud de ramas, los patrones de ramificación, etc. En futuros trabajos, sería importante evaluar esas variables, desarrollando algún método para cuantificar los patrones de ramificación, por ejemplo.

En el caso de *P. pseudostrobus*, parece existir cierta contradicción entre la no significancia de diferencias entre poblaciones en el ANOVA, y la forma de las curvas de respuesta al movimiento altitudinal (crecimiento relativo de planta vs. distancia de transferencia altitudinal). Al no encontrarse diferencias significativas en el ANOVA entre poblaciones para crecimiento relativo, se esperaría que la respuesta de las poblaciones al movimiento altitudinal (distancia de transferencia climática), mostrará solo la variación entre sitios, pero no variación entre poblaciones creciendo en un mismo sitio (algo similar a lo observado en *P. leiophylla*). Sin embargo, la curva de regresión observada, tiene un marcado patrón y es altamente significativa (se ajusta a un modelo de regresión cuadrático). Parece que desde un punto de vista estadístico, el ANOVA no resultó lo suficientemente poderoso para detectar diferencias significativas entre poblaciones, pero el análisis de regresión muestra claramente que entre más se alejan las poblaciones de su altitud de origen, menor desempeño tienen.

Lo ideal en este punto, sería probar algún análisis estadístico más novedoso, como podría ser un modelo de efectos mixtos (tal como el realizado por Leites *et al.*, 2012), el cual incorpore las variables del diseño experimental como factores aleatorios (sitios, bloques, especies y poblaciones dentro de especie), y los valores climáticos e índices de transferencia como factores fijos (ya sea expresados como diferencias en altitud o como diferencias en las variables climáticas). Esto requeriría análisis adicionales.

En el caso de que para alguna de éstas especies se encuentran diferencias entre poblaciones, entonces las prácticas de migración asistida deben tomar en consideración los límites de zonas altitudinales para la colecta y movimiento de semillas previamente establecidas, que en el caso de *Pinus pseudostrobus* son zonas de 300 m de diferencia altitudinal (Sáenz-Romero *et al.*, 2012).

En general, el desempeño de las poblaciones que han sido migradas se ajusta a un modelo de regresión cuadrática, en donde conforme una población se aleja del sitio

en el que se originó, ya sea hacia una mayor o menor altitud que su sitio de origen, su crecimiento disminuye. En términos generales, por cada 100 m que se sube en el gradiente altitudinal, se tiene una disminución de crecimiento del 5%, respecto a lo que se obtiene si la población estuviera creciendo a la misma altitud a la que se originó.

En base a los resultados anteriores, se recomienda empezar a considerar a la migración asistida de poblaciones forestales, como una estrategia viable de adaptación al cambio climático, probablemente sin exceder en el movimiento, el ancho máximo de las zonas altitudinales, cuando éstas sean disponible: 400 m de diferencia altitudinal para *P. devoniana* (Sáenz-Romero y Tapia Olivares, 2008) y 300 m para *P. pseudostrobus* (Sáenz-Romero *et al.*, 2012).

## REFERENCIAS

- Leites, L. P., Robinson, A. P., Rehfeldt, G. E., Marshall, J. D., Crookston, N. L. 2012. Height growth response to climatic changes differs among populations of Douglas-fir : a novel analysis of historic data. *Ecological Applications*, 22 (1): 154 – 165.
- Sáenz-Romero, C., & Tapia-Olivares, B. L. (2008). Genetic variation in frost damage and seed zone delineation within an altitudinal transect of *Pinus devoniana* (*P. michoacana*) in México. *Silvae Genetica* 57 (3): 165 – 170.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, A., Zamarripa-Morales, V., & López-Upton, J. (2012). Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacán, México. Two location shadehouse test results. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32 (2): 111 – 120.