

**DISEÑO DE DOS HUERTOS SEMILLEROS DE *Pinus greggii*
Engelm. Y LA VULNERABILIDAD A LA CAVITACIÓN**

BENITO NATALIO GUTIÉRREZ VÁZQUEZ

TESIS

**Presentada como requisito parcial
para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
AGRARIA
ANTONIO NARRO**



**PROGRAMA DE POSTGRADO
EN INGENIERÍA DE
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila,
México**

Noviembre de 2008

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIRECCIÓN DE POSTGRADO

DISEÑO DE DOS HUERTOS SEMILLEROS DE *Pinus greggii* Engelm. Y
LA VULNERABILIDAD A LA CAVITACIÓN

TESIS

POR

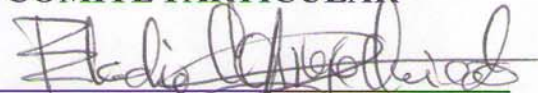
BENITO NATALIO GUTIÉRREZ VÁZQUEZ

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de asesoría y aprobada
como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

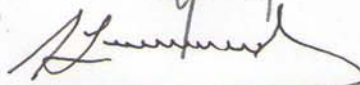
COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal:



Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo

Asesor:



Dr. Alejandro Zermeno González

Asesor:

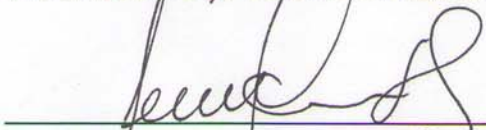


Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal

Asesor:



M.C. Salvador Valencia Manzo



Dr. Jerónimo Landeros Flores

Director de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Noviembre de 2008.

COMPENDIO

DISEÑO DE DOS HUERTOS SEMILLEROS DE *Pinus greggii* Engelm. Y LA
VULNERABILIDAD A LA CAVITACIÓN

POR

BENITO NATALIO GUTIÉRREZ VÁZQUEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. NOVIEMBRE DE 2008

Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo.- Asesor-

Palabras clave: *Pinus greggii*, componentes principales, índice de selección, huerto semillero, cavitación del xilema, conductividad hidráulica, eficiencia hidráulica.

Los objetivos del presente trabajo fueron determinar dos índices de selección de árboles semilleros, para establecer dos huertos semilleros, así como diseñar dos planes de simulación y aplicación de aclareos silvo - genéticos en dos diferentes ensayos de progenie de *Pinus greggii* Engelm.var. *greggii* uno establecido en el CAESA (Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga) y otro establecido en el predio particular Los Tarihuanes,

Arteaga, Coah. Así como determinar la vulnerabilidad del xilema a la cavitación de dos familias de *Pinus greggii* Engelm. en el ensayo de progenie de la especie establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Para determinar los índices de selección, se realizó un análisis de componentes principales (CP), hasta reducir de catorce a seis variables alcanzando a explicar el 87.6% de la varianza con los dos primeros CP en el CAESA y de trece a seis variables alcanzando a explicar el 92.0% de la varianza con los dos primeros CP en Tarihuanes. El índice de selección quedó integrado por las variables: diámetro basal, diámetro normal, volumen de Pressler, altura total, diámetro de copa y diámetro de ramas en ambos casos, en el CAESA y en Tarihuanes. El huerto semillero se diseñó mediante el Software Stand Visualization System (SVS), dejando 44 árboles en 0.28 ha, con una densidad de 156 árboles ha⁻¹ en el CAESA y dejando 34 árboles en 0.35 ha, con una densidad de 97 árboles ha⁻¹ en Tarihuanes.

Para evaluar la vulnerabilidad del xilema a la cavitación, se determinaron las curvas de vulnerabilidad hidráulica para dos familias (19 y 21) de *Pinus greggii* var. *greggii*, también se construyó una curva para representar la especie de *P. greggii* var. *greggii*, utilizando los datos de ambas familias.

De acuerdo a la función de Pammenter y Vander (1998) el valor de 100 es usado para representar la pérdida máxima en conductividad. El Coeficiente *b* determina la posición de la curva sobre la abscisa y da el potencial hídrico correspondiente a 50% de pérdida de conductividad. Según el mecanismo de cavitación por inyección de aire, la mayor

vulnerabilidad pudiera estar asociada con un máximo de poros con membranas de punteaduras grandes, y el coeficiente b (β_1) podría relacionarse a la media del poro con punteaduras más grandes por vaso. El coeficiente a (β_0) está relacionado principalmente a la inclinación de la curva, y por lo tanto al rango de potenciales hídricos sobre el cuál la conductividad se pierde. Una ligera inclinación sugiere la cavitación de los conductos del xilema es por una amplia gama de tensiones, y entonces a podría estar relacionada a la distribución de los poros de máximo tamaño por vaso.

En el análisis de comparación de medias para los valores de a (β_0) y b (β_1) entre las familias 19 y 21, no se encontraron diferencias significativas. Tampoco se encontraron diferencias significativas en la eficiencia hidráulica y en la conductividad máxima, quizás se deba a la baja variabilidad que existe dentro de las poblaciones de *Pinus greggii* y que las familias usadas en el presente estudio han sido seleccionados para otras propiedades y no por las características hidráulicas, lo que implica que el evento de cavitación en la columna de agua de xilema se inicien a potenciales hídricos similares en ambas familias. *Pinus greggii* var. *greggii* presentó una vulnerabilidad ligeramente mayor que otras pináceas reportadas en estudios previos.

ABSTRACT

DESIGN OF TWO SEED ORCHARD OF *Pinus greggii* Engelm. AND THE CAVITATION
VULNERABILITY

BENITO NATALIO GUTIÉRREZ VÁZQUEZ

MASTER OF SCIENCES
IN ENGINEERING OF PRODUCTION SYSTEMS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. NOVEMBER OF 2008

Eladio H. Cornejo Oviedo, Ph.D.- Advisor-

Key words: *Pinus greggii*, main components, selection index, seed orchard, xylem cavitation, hydraulic conductivity, hydraulic efficiency.

The objectives of the study were to select seed trees and design two seed orchards by doing silvo - genetic thinnings. To determine the selection index, a principal components (CP) analysis was conducted. The CP analysis reduced from fourteen to six variables explaining 87.6% of the variance with the first two CP at the CAESA and from thirteen to six variables explaining 92.0% of the variance with the first two CP at Tarihuanes. The selection index was integrated by basal diameter, normal diameter, volume of Pressler, total height, canopy diameter, and diameter of branches in both the CAESA and Tarihuanes. The seed orchards were designed using the Stand Visualization System (SVS). The seed orchard consisted of 44

trees in 0.28 ha, with a density of 156 tree ha⁻¹ in the CAESA and at Tarihuanes, the seed orchard consisted of 34 trees in 0.35 ha, with a density of 97 tree ha⁻¹.

To evaluate the vulnerability of the xylem to cavitation, the hydraulic vulnerability curves were constructed for two families (19 and 21) of *Pinus greggii* var. *greggii*, also a curve to represent the species was constructed, using data from both families.

According to the function of Pammenter and Vander (1998) the value of 100 is used to represent the maximum loss in conductivity. The coefficient ***b*** determines the position of the curve on the abscissa and it gives the water potential corresponding to 50% of loss of conductivity. According to the cavitation mechanism for air injection, the biggest vulnerability could be associated with a maximum of pores with membranes of big pit, and the coefficient ***b*** (β_1) it could be related to the mean of the pore with big pit for vessel. The coefficient to ***a*** (β_0) is related one mainly to the inclination of the curve, therefore, to the range of water potential on which the conductivity gets lost. A slight inclination suggests that the cavitation of the conduits of the xylem is for a wide range of tensions, and then to it could be related to the distribution of the pores of maximum size for vessel.

In the comparison analysis of mean for the values of ***a*** (β_0) y ***b*** (β_1) between the families 19 and 21, no significance differences were found. Not significant differences in the hydraulic efficiency and the maximum conductivity were found. This could be due to the low natural variability within the populations of *Pinus greggii* and the families used in this study were selected for other properties rather than for hydraulic characteristics. Implying that cavitation

event in the xylem column water begins a similar water potential in both families. *Pinus greggii* Engelm.var. *greggii* presented a slightly higher vulnerability to cavitation than other pinaceas species.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
DISEÑO DE HUERTO SEMILLERO DE <i>Pinus greggii</i> Engelm. EN EL CAESA, ARTEAGA, COAHUILA	4
RESUMEN	4
ABSTRACT.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS	7
Descripción del área experimental.....	7
Variables evaluadas	7
Análisis estadístico	10
Simulación de aclareos	10
Caracterización fenotípica y diferencial de selección.....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
Análisis de componentes principales.....	12
Simulación de aclareos	15
Caracterización fenotípica de la plantación y diferencial de selección	19
CONCLUSIONES	21
BIBLIOGRAFÍA	23
DISEÑO DE HUERTO SEMILLERO DE <i>Pinus greggii</i> Engelm. EN JAMÉ, ARTEAGA, COAHUILA	26
RESUMEN	26
ABSTRACT.....	26
INTRODUCCIÓN.....	27
MATERIALES Y MÉTODOS	29
Descripción del área experimental.....	29
Variables evaluadas	30
Análisis estadístico	32
Simulación de aclareos	32
Caracterización fenotípica y diferencial de selección.....	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
Análisis de componentes principales.....	33
Simulación de aclareos	37
CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	44

VULNERABILIDAD DEL XILEMA A LA CAVITACION EN <i>Pinus greggii</i> Engelm. EN ARTEAGA, COAHUILA	47
RESUMEN	47
ABSTRACT	48
INTRODUCCIÓN	49
MATERIALES Y MÉTODOS	51
Descripción del área experimental	51
Colecta de ramas de los árboles	52
Conductividad hidráulica	53
Vulnerabilidad a la cavitación de xilema	55
Parámetro de eficiencia hidráulica	55
Análisis estadístico	56
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	63
DISCUSIÓN GENERAL	67
CONCLUSIONES GENERALES	70
BIBLIOGRAFÍA GENERAL	71
APÉNDICE	74

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Eigenvalores de las variables dasométricas y de arquitectura de copa en los dos primeros componentes principales en el ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.	12
Cuadro 2. Eigenvalores de las variables dasométricas y de arquitectura de copa en los dos primeros componentes principales en el ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en Los Tarihuanes, Arteaga, Coahuila.	34
Cuadro 3. Comparación de los valores medios de los coeficientes a y b con la prueba de t , utilizados para ajustar la ecuación sigmoideal exponencial usada para describir la curvas de vulnerabilidad de las familias 19, 21 y para la especie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila. Los valores de r^2 son de la regresión lineal de los datos transformados (ecuación 3).	60
Cuadro 4. Comparación de los valores medios de la kh máxima y la eficiencia hidráulica de las familias 19, 21 con la prueba de t , para la especie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Dispersión de los árboles con base en los componentes principales 1 y 2, obtenido de las variables de arquitectura de copa y dasométricas en el ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.	13
Figura 2. Ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila (a), huerto semillero diseñado (b) y vista de las copas del huerto semillero diseñado (c).	17
Figura 3. Simulación de aclareos en el ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila. Primer aclareo (a) y segundo aclareo (b).	18
Figura 4. Dispersión de los árboles con base en los componentes principales 1 y 2, obtenido de las variables de arquitectura de copa y dasométricas en el ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Tarihuanes, Arteaga, Coahuila.	35
Figura 5. Ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en en Los Tarihuanes, Arteaga, Coahuila. (a), huerto semillero diseñado (b) y vista de las copas del huerto semillero diseñado (c).	39
Figura 6. Simulación de aclareos en el ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., en Los Tarihuanes, Arteaga, Coahuila. Primer aclareo (a) y segundo aclareo (b).	40
Figura 7. (a) sistema utilizado para evaluar la vulnerabilidad del xilema a la cavitación en tallos de <i>Pinus greggii</i> Engelm., (b) sistema utilizado para la estandarización de tallos (limpieza de embolismo pre-existente).	54
Figura 8. Vulnerabilidad del xilema a la cavitación ilustrada como el porcentaje de la pérdida de conductividad con la disminución del potencial hídrico de la familia 21 del ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.	58
Figura 9. Vulnerabilidad del xilema a la cavitación ilustrada como el porcentaje de la pérdida de conductividad con la disminución del potencial hídrico de la familia 19 del ensayo de progenie de <i>Pinus greggii</i> Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.	58
Figura 10. Vulnerabilidad del xilema a la cavitación ilustrada como el porcentaje de la pérdida de conductividad con la disminución del potencial hídrico de la especie de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> de muestras del ensayo de progenie de la especie establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.	59

INTRODUCCIÓN GENERAL¹

En México, las prácticas de mejoramiento genético forestal se han orientado al cultivo en bosques naturales con arbolado que presenta las mejores características fenotípicas. Se han aplicado diferentes sistemas y tratamientos silvícolas que, en los mejores casos, han asegurado únicamente la regeneración de los bosques, sin la certeza de que el renuevo presente una ganancia genética efectiva (Azamar *et al.*, 2000).

A medida que se avanza en un programa de mejoramiento genético es indispensable utilizar metodologías de evaluación más eficientes que la selección masal (Torres, 2000). Una de esas metodologías es el índice de selección, el cual presenta una gran ventaja en el mejoramiento genético, ya que es de gran ayuda para seleccionar genotipos con base en características fenotípicas y permite seleccionar múltiples características en forma simultánea (Zobel y Talbert, 1988). En un índice de selección a través del método multivariados basado en componentes principales (CP), el primer CP es el que mejor determina la proporción y vector característico de los valores fenotípicos de los caracteres objeto de estudio. Los elementos del vector característico del primer componente determinan la proporción con que los caracteres respectivos contribuyen al nuevo índice (Cerón y Sahagún, 2005).

Pinus greggii Engelm. es una especie de rápido crecimiento y precoz en su floración, donde la mayoría de sus poblaciones se encuentran seriamente amenazadas por factores naturales y antropogénicos, provocando el aislamiento y la reducción de sus poblaciones

¹ Presentación de acuerdo al formato de la Revista Fitotecnia Mexicana

(López *et al.*, 1993). Al realizar un estudio de variación isoenzimática en diez poblaciones naturales de *Pinus greggii*, seis ellas del Norte, Ramírez *et al.* (1997) encontraron que existe una reducción de la diversidad genética de esta especie, debido a la tendencia de los alelos hacia el monomorfismo y a que las poblaciones de la especie se encuentren en áreas restringidas y aisladas entre sí. También indican que muchas de estas poblaciones muestran una alta prioridad para la conservación de genes y la existencia de altas diferencias entre poblaciones y una baja variabilidad dentro de poblaciones.

El cambio climático global es una razón urgente para conservar una gama de recursos genéticos en las especies comerciales. Los modelos climáticos proyectan hasta un incremento de 5°C en la temperatura global en los próximos 50 años como resultado del “efecto de invernadero” (Vargas *et al.*, 2004). También mencionan que en episodios previos de calentamiento, las especies forestales y las poblaciones dentro de las especies se movieron hacia mayores elevaciones. Para mantener la productividad en un clima más cálido se tendría que mover poblaciones de menores a mayores elevaciones. Con base en la ley de Hopkins, la temperatura disminuye cerca de 1.4°C por cada 305 m de aumento en elevación. Por lo tanto, para el clima proyectado dentro de 50 años, se tendría que plantar sitios con fuentes de semilla de elevaciones 550 m más bajas.

Una consecuencia inmediata de la cavitación del xilema es la reducción de la fotosíntesis y el crecimiento (Sperry y Pockman, 1993). El vínculo directo entre el transporte de agua sostenido, la supervivencia de la planta y el crecimiento sugiere que puede haber una fuerte selección para la evolución de alta resistencia a la cavitación del xilema. A pesar del

potencial para la selección para favorecer la alta resistencia a la cavitación, hay una considerable variación inter-específica en la resistencia de los árboles a la cavitación del xilema inducida por estrés hídrico (Hafiz *et al.*, 2004).

Los objetivos del presente trabajo fueron determinar dos índices de selección de árboles semilleros, para establecer dos huertos semilleros, así como diseñar dos planes de simulación y aplicación de aclareos silvo - genéticos en dos diferentes ensayos de progenie de *Pinus greggii* var. *greggii*, uno establecido en el CAESA y otro establecido en el predio particular Los Tarihuanes, en Arteaga, Coah. Así como determinar la vulnerabilidad del xilema a la cavitación de *Pinus greggii* en un ensayo de progenie de la especie establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Cada uno de estos objetivos se presenta como un trabajo independiente; el primero se denomina “Diseño de huerto semillero de *Pinus greggii* Engelm. en el CAESA, Arteaga, Coahuila”. El segundo se denomina “Diseño de huerto semillero de *Pinus greggii* Engelm. en Jamé, Arteaga, Coahuila”. El tercero se denomina “Vulnerabilidad de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* a la cavitación del xilema en Arteaga, Coahuila”. Al final se presenta la discusión general y las conclusiones generales, respectivamente.

**DISEÑO DE HUERTO SEMILLERO DE *Pinus greggii* Engelm. EN EL CAESA,
ARTEAGA, COAHUILA**

**Benito N. Gutiérrez Vázquez, Eladio H. Cornejo Oviedo, Alejandro Zermeño González,
Salvador Valencia Manzo, Rosalinda Mendoza Villarreal**

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en un ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Arteaga, Coah. El objetivo fue diseñar un huerto semillero mediante la simulación de aclareos silvo – genéticos y la selección de árboles mediante un índice de selección. Para determinar el índice de selección se realizó un análisis de componentes principales (CP), hasta reducir de catorce a seis variables alcanzando a explicar el 87.64% de la varianza con los dos primeros CP. El índice de selección quedó integrado por las variables: diámetro basal, diámetro normal, volumen de Pressler, altura total, diámetro de copa y diámetro de ramas. El huerto semillero se diseñó mediante el Software Stand Visualization Sistem (SVS), dejando 44 árboles en 0.28 ha, con una densidad de 156 árboles ha⁻¹.

Palabras clave: *Pinus greggii*, componentes principales, índice de selección, huerto semillero.

ABSTRACT

The study was conducted in a progeny test of *Pinus greggii* Engelm. established at Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Arteaga, Coah. The objective was to design a seed orchard by simulating a silvo - genetic thinning and tree selection through a

selection index. To determine the selection index a principal components (CP) analysis was conducted. The CP analysis reduced from fourteen to six variables explaining 87.6% of the variance with the first two CP. The selection index was integrated by basal diameter, normal diameter, volume of Pressler, total height, canopy diameter, and diameter of branches. The seed orchard was designed using the Stand Visualization System (SVS). The seed orchard consisted of 44 trees in 0.28 ha, with a density of 156 tree ha⁻¹.

Key words: *Pinus greggii*, principal components, selection index, seed orchard.

INTRODUCCIÓN

El suministro insuficiente de semilla es visto a menudo como el principal factor limitante para el desarrollo de los programas de plantación. Los huertos semilleros son el medio principal para producir germoplasma y que genere ganancias genéticas significativas (Granhof, 1991).

Pinus greggii Engelm. es una especie de rápido crecimiento y precoz en su floración, donde la mayoría de sus poblaciones se encuentran seriamente amenazadas por factores naturales y antropogénicos, provocando el aislamiento y la reducción de sus poblaciones (López *et al.*, 1993). Por otro lado, al realizar un estudio de variación isoenzimática en diez poblaciones naturales de *Pinus greggii*, seis de ellas del Norte, incluida la población de Los Lirios, Arteaga, Coah. a la cual pertenecen las familias que se están evaluando en este trabajo, (Ramírez *et al.* 1997) encontraron que existe una reducción de la diversidad genética de esta especie, debido a la tendencia de los alelos hacia el monomorfismo y a que las poblaciones de

la especie se encuentren en áreas restringidas y aisladas entre sí. También indican que muchas de estas poblaciones muestran una alta prioridad para la conservación de genes y la existencia de altas diferencias entre poblaciones y una baja variabilidad dentro de poblaciones.

A medida que se avanza en un programa de mejoramiento genético, es indispensable utilizar metodologías de evaluación más eficientes que la selección masal (Torres, 2000). Una de esas metodologías es el índice de selección, el cual presenta una gran ventaja en el mejoramiento genético, ya que es de gran ayuda para seleccionar genotipos con base en características fenotípicas y permite seleccionar múltiples características en forma simultánea (Zobel y Talbert, 1988). Un índice de selección a través del método multivariados basado en componentes principales (CP), involucra el primer CP que determina la proporción y vector característico de los valores fenotípicos de los caracteres objeto de estudio. Los elementos del vector característico del primer componente determinan la proporción con que los caracteres respectivos contribuyen al nuevo índice (Cerón y Sahagún, 2005).

El objetivo del trabajo fue diseñar un huerto semillero, mediante un plan de simulación y aplicación de aclareos silvo – genéticos y la selección de arboles a través de un índice de selección en un ensayo de progenie de *Pinus greggii* var. *greggii* establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área experimental

En julio de 1992 se estableció un ensayo de progenie de *P. greggii* en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) de la UAAAN, en Arteaga, Coah., ubicado a 45 km de Saltillo, Coah., mismo que se ubica entre las coordenadas geográficas 25° 23' a 25° 24' de latitud norte y 100° 36' a 100° 37' de longitud oeste, a una altitud de 2280 msnm. Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con cinco repeticiones por familia, cada repetición (parcela) con tres plantas. El DCA tuvo la restricción de no establecer dos parcelas de la misma familia juntas. Se plantó en cepa común, a una equidistancia de 2.5 m y se distribuyó en tresbolillo. Se utilizaron 345 plantas de la progenie de 22 árboles maternos procedentes de Los Lirios, Arteaga, Coah., y un testigo cuyo origen geográfico es La Colorada, Arteaga, Coah. Las plantas contaban con 22 meses de edad al momento de la plantación. Se utilizaron 101 plantas de borde de *Pinus halepensis* Mill. De acuerdo con la estación meteorológica de San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Coah., ubicada a 12 km del CAESA, el clima del área es templado con verano fresco y largo, con una temperatura media anual de 13.6° C; la precipitación media anual es de 521.2 mm; la fórmula climática del área de estudio es Cb(X')(Wo)(e)g (García, 1987).

Variables evaluadas

Las variables que se evaluaron para construir el índice de selección fueron: la altura total del árbol, el diámetro basal y el diámetro normal (a 1.30 metros a partir del suelo). Para el cálculo de los crecimientos relativos se consideró la altura total inicial y el diámetro basal

inicial medidos en 1992. La altura total, el diámetro basal y el diámetro normal finales se evaluaron en diciembre de 2006.

También se midió el diámetro de copa, el diámetro de las tres ramas más gruesas que se encontraban en cada uno de los tres primeros verticilos por arriba del diámetro normal, el ángulo de inclinación de las ramas con respecto al fuste. Además, se calificó la rectitud del fuste usando números del uno al cuatro como sigue: el 1 para árboles rectos, 2 para árboles inclinados, 3 para árboles torcidos y 4 para árboles bifurcados. Se realizó un conteo directo desde la base del árbol hasta la yema apical para las variables número de verticilos y número de ramas por verticilo, considerando como verticilo todos aquellos que tenían dos o más ramas. En el caso de las ramas por verticilo se obtuvo un promedio de las ramas de cada verticilo.

Además, a cada árbol se le extrajo un cilindro de madera a la altura de 30 cm, utilizando un taladro de Pressler. Cada muestra se identificó con un número progresivo y se guardó en un popote de plástico para su protección, hasta el traslado al laboratorio. Con dicha muestra, se determinó la densidad relativa (peso anhidro/volumen verde) de la madera, utilizando el método empírico propuesto por Valencia y Vargas (1997).

Se calcularon los crecimientos relativos en altura total (CRA) y en diámetro basal (CRDB), ambas mediante la ecuación 1.

$$CRA = \frac{h_{2006} - h_{1992}}{T_2 - T_1}$$

Ecuación 1

Donde: CRA = Crecimiento relativo en altura; Ln = Logaritmo natural; A_f = Altura final; A_i = Altura inicial; T_f = Tiempo final (20 de diciembre de 2006); T_i = Tiempo inicial (1992).

El volumen de Pressler (Romahn, 1991) se calculó con la ecuación 2.

$$V = \frac{2}{3} * (A * h) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: V= Volumen de Pressler (m³); A= Área seccional transversal del tronco a 1.30 m de altura (m²); h = Altura de Pressler = d + 1.30 m + 0.65 m (valores 1.30 y 0.65 son constantes); d =Distancia entre diámetro normal y la sección con diámetro igual a la mitad del diámetro normal (m).

Se estimó un cociente de ramas (Cocirama) que se obtuvo con el diámetro a la base del árbol y el promedio del diámetro de las ramas más gruesas que se encontraban en los tres verticilos por arriba del diámetro normal (Ecuación 3).

$$\text{Cocirama} = \frac{DB}{D_{promr}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: Cocirama = cociente de ramas; DB = Diámetro basal; D_{promr} = Diámetro promedio de las ramas.

Todas las variables se estandarizaron con la finalidad de cumplir con el procedimiento de los análisis multivariados (SAS Institute Inc., 1999), para la estandarización del ángulo de las ramas se realizó una transformación angular y para el resto de las variables se realizo con la ecuación 4.

$$ZU = \left[\frac{xy}{s_y} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: Z_{ij} = Nuevo valor estandarizado; X_{ij} = Valor de la observación i en la variable j ; S_j = Desviación típica o estándar de los valores de la variable j .

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de componentes principales con el Statistical Analysis System (SAS) versión 9.1, utilizando el procedimiento PROC PRINCOMP. El procesamiento de los datos se realizó mediante un proceso interactivo hasta reducir de catorce a seis variables (diámetro basal, diámetro normal, diámetro de copa, volumen de Pressler, altura total y el diámetro de ramas) alcanzando a explicar el 87.6% de la varianza con los dos primeros CP. Para agrupar los árboles de acuerdo a las variables resultantes de la reducción de los CP, se utilizó el procedimiento PROC CLUSTER de SAS para lo cual se probaron los métodos: Average, Twostage $K=3$, Ward Pseudo, Density $K = 3$, Single y Centroid. Para seleccionar el mejor método se buscó el grupo que presentara los valores más altos del criterio cúbico de agrupamiento (CCA) y de la pseudo F estadística. Cada árbol se identificó con un código diferente para ubicarlo en que grupo se encontraba.

La construcción del índice para la selección de los mejores árboles se creó sobre la base de la correlación entre las variables dasométricas y de forma de copa. Se eliminaron las variables que no presentaran una alta correlación dentro de los CP que mejor explicaran la variación total, seleccionando solamente las variables que mejor se asociaran dentro de los CP.

Simulación de aclareos

Una vez obtenido el índice de selección se realizó la validación de los árboles en campo, verificando cuales fueron las variables de los árboles, por las que se habían integrado a cada grupo. En la validación se observaron espacios dentro del ensayo debido a la mortalidad (24.9%), además muchos árboles aún no tienen un tallo fuerte, por lo que se consideró dejar árboles no selectos de protección en los lugares donde los vientos ocurren con mayor frecuencia. Para la simulación de los aclareos, se utilizó el sistema de visualización de rodales (SVS) Versión 3.36, (McGaughey, 2000) con el cual se diseñó el huerto semillero, representando actualmente el ensayo de progenie y cada una de la simulación de los aclareos. Los criterios que se consideraron en la simulación fueron, el aclareo geométrico, el espaciamiento y la representatividad de las familias; así como las variables del índice de selección y el micrositio.

Caracterización fenotípica y diferencial de selección

Con los datos del diámetro normal, la altura total, el volumen de Pressler, la rectitud del fuste y la densidad de la madera, se determinó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Además se determinó el diferencial de selección (Zobel y Talbert, 1988), considerando las variables anteriores (Ecuación 5).

$$S = \bar{X}_s - \bar{X}$$

Ecuación 5

Donde: S = Diferencial de selección; \bar{X}_s = Media de individuos seleccionados; \bar{X} = Media de la población base.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de componentes principales

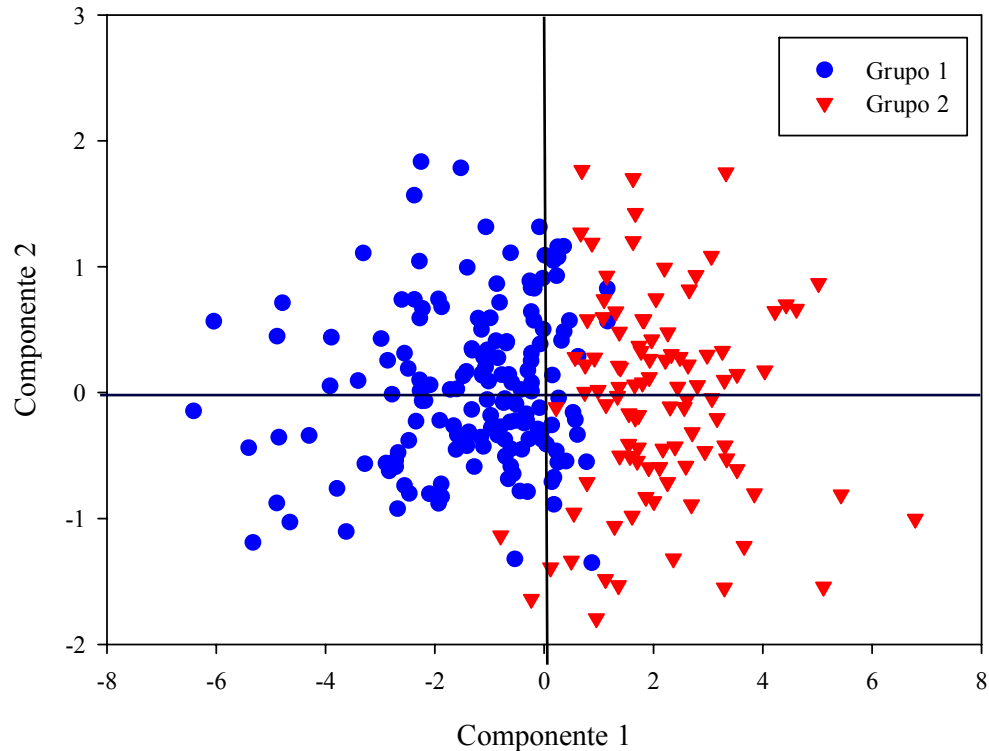
Los componentes principales (CP)1 y 2 explicaron el 87.6% de la variación total; además de su contribución relativa individual en cada CP (Cuadro 1). Las variables que presentaron mayor contribución relativa a la variación total fueron las variables dasométricas. El primer CP explicó el 79.5%, donde las variables diámetro basal, diámetro normal, volumen de Pressler y diámetro de copa, presentaron una mayor correlación con el componente; además las variables altura total y el diámetro de ramas presentaron una fuerte correlación, pero menor que las variables antes mencionadas dentro del primer CP (Cuadro 1). El índice de selección quedó integrado por las seis variables señaladas.

Cuadro 1. Eigenvalores de las variables dasométricas y de arquitectura de copa en los dos primeros componentes principales en el ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Variable	Componente principal (Varianza explicada)	
	1 (79.5%)	2 (8.13%)
Diámetro basal	0.438	-0.102
Diámetro normal	0.441	-0.088
Diámetro de copa	0.415	-0.116
Volumen de Pressler	0.427	0.020
Altura total	0.350	0.858
Diámetro de ramas	0.369	-0.481

Se encontró que el método que mejor agrupaba los árboles de acuerdo al índice de selección fue el Ward pseudo con dos grupos, de acuerdo a los valores más altos del criterio cubico de agrupamiento (CCA)= 6.24 y de la pseudo F con un valor de 440; definiendo dos grupos. El grupo 1, se integró de acuerdo al diámetro basal, diámetro normal, diámetro de

copa y volumen de Pressler. En cambio, el grupo 2 se formó de acuerdo a la altura con correlación positiva y con el diámetro de ramas, presentando correlación negativa (Figura 1).



* El grupo 1, esta formado por los árboles más pequeños y el grupo 2, por los árboles más grandes y los cuales son candidatos a ser selectos como árboles semilleros de acuerdo al índice de selección.

Figura 1. Dispersión de los árboles con base en los componentes principales 1 y 2, obtenido de las variables de arquitectura de copa y dasométricas en el ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Los árboles del grupo 2 tuvieron valores promedios más altos que los de grupo 1, en variables como densidad de la madera (0.52 vs 0.36), diámetro basal (18.05 vs 12.96), diámetro normal (13.1 vs 9.1), altura total (8.06 vs 6.58) y volumen de Pressler (0.053 vs 0.023).

El índice de selección formado por el diámetro basal, diámetro normal, volumen de Pressler, altura total, diámetro de copa y diámetro de ramas, permitieron seleccionar 44 árboles y dejar una densidad de 156.4 árboles ha⁻¹; siendo el primer componente quien mejor explicó la contribución de estas variables, lo cual reafirma lo encontrado por Cerón y Sahagún (2005).

En la selección de árboles de *Cupressus lusitanica* Mill. para el establecimiento de un huerto semillero en Colombia, se utilizó la resistencia a plagas y enfermedades, volumen del árbol, rectitud del fuste, forma de la copa y calidad de la madera (Ladrach *et al.*, 1977). En la construcción de un índice de selección para incrementar el peso seco de la madera en *Pinus taeda* Schl. *et* Cham., en una prueba de progenie en el suroeste de Georgia, Bridgwater *et al.* (1983) encontraron que la altura, diámetro normal y el volumen, permitía un 17% de ganancia. En la construcción de un índice de selección para *Pinus banksiana* Lamb. en una prueba de progenies, establecida en cuatro localidades de Brunswick, se utilizó la altura, el diámetro, el volumen y la densidad de la madera (Park *et al.*, 1989). Mientras que para la conversión de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* a huerto semillero en el Estado de México, se seleccionaron los árboles con base en la rectitud, grosor y número de ramas (Azamar *et al.*, 2000).

Al respecto, para la construcción de un índice de selección, en un ensayo de progenie de *Pinus radiata* D. Don, Torres (2000) utilizó el diámetro normal y altura, variables utilizadas en el índice construido en este trabajo. Por su parte, en un estudio efectuado en una prueba de progenies de *P. patula* Schiede de seis años de edad, establecida en Zacualpan, Ver., Valencia y Vargas (2001) utilizaron variables de crecimiento como altura, diámetro, volumen

y biomasa del tronco. En la transformación de un ensayo de progenie a huerto semillero de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden establecido en Argentina, los criterios de selección fueron dominancia en altura, diámetro normal y volumen (Harrand, 2002). Por otro lado, al evaluar la eficiencia de la selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *Ayacahuite*, Farfán *et al.*, (2002) utilizaron variables como diámetro a la base, diámetro normal y altura.

Simulación de aclareos

Para llevar a cabo el diseño del huerto semillero, se consideró la representatividad de las familias para obtener mayor variación, lo que consistió en no dejar en una misma parcela, árboles de la misma familia y dejando el mayor número de familias posibles; al final se logró que todas las familias quedaran representadas dentro del huerto semillero, donde el testigo y las familias 17, 19, 33, 34 y la 38, fueron las que mejor representadas quedaron con 8 individuos cada una. Así como también se dejó árboles en los espacios grandes, para aprovechar la superficie del ensayo. Se realizaron aclareos geométricos de tal manera que existiera suficiente espacio para el movimiento de maquinaria para el futuro manejo del huerto. Al realizar la simulación del primer aclareo, llevando a cabo un aclareo por lo bajo y geométrico, se eliminarán 131 árboles, de esta forma se elimina el 50.6% del total de la población superviviente, dejando una densidad de 455.1 árboles ha⁻¹. En la simulación del segundo aclareo, se eliminarán 84 árboles, eliminando el 32.4% en relación al total de la población, dejando 44 árboles totales en pie en 0.28 ha, con una densidad de 156.4 árboles ha⁻¹ (Figuras 2 y 3).

El huerto se diseñó con 44 árboles en 0.28 ha, con una densidad de 156 árboles ha⁻¹, para permitir la operación mecánica por tractores y otras máquinas, para el manejo futuro del huerto de acuerdo con Clausen (1990) y Schmidt (1993). En el establecimiento de un huerto semillero en Colombia de *Cupressus lusitanica* se dejó una densidad de 190 árboles ha⁻¹ (Ladrach *et al.*, 1977). Mientras que para la conversión de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* a huerto semillero en el Estado de México, fue una densidad de 339 árboles ha⁻¹ (Azamar *et al.*, 2000). En la transformación de un ensayo de progenies transformado en huerto semillero de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden establecido en Argentina, se seleccionaron 265 árboles ha⁻¹ (Harrand, 2002). Zobel y Talbert (1988) recomiendan una densidad de 80 a 150 árboles ha⁻¹, mientras que Schmidt (1993) recomienda una densidad de 100 árboles ha⁻¹.

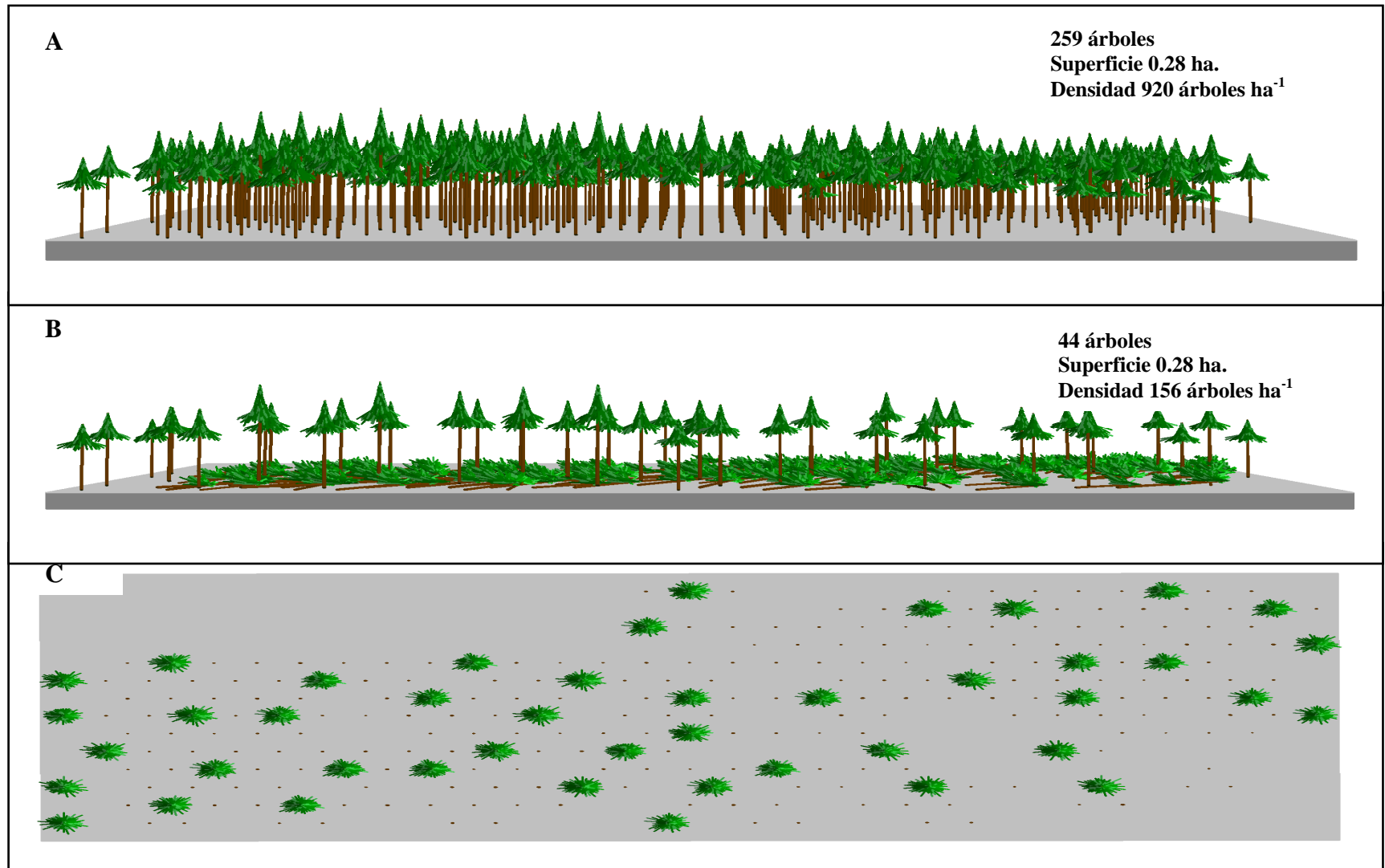


Figura 2. Ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila (A), Huerto semillero diseñado (B) y vista de las copas del huerto semillero diseñado (C).

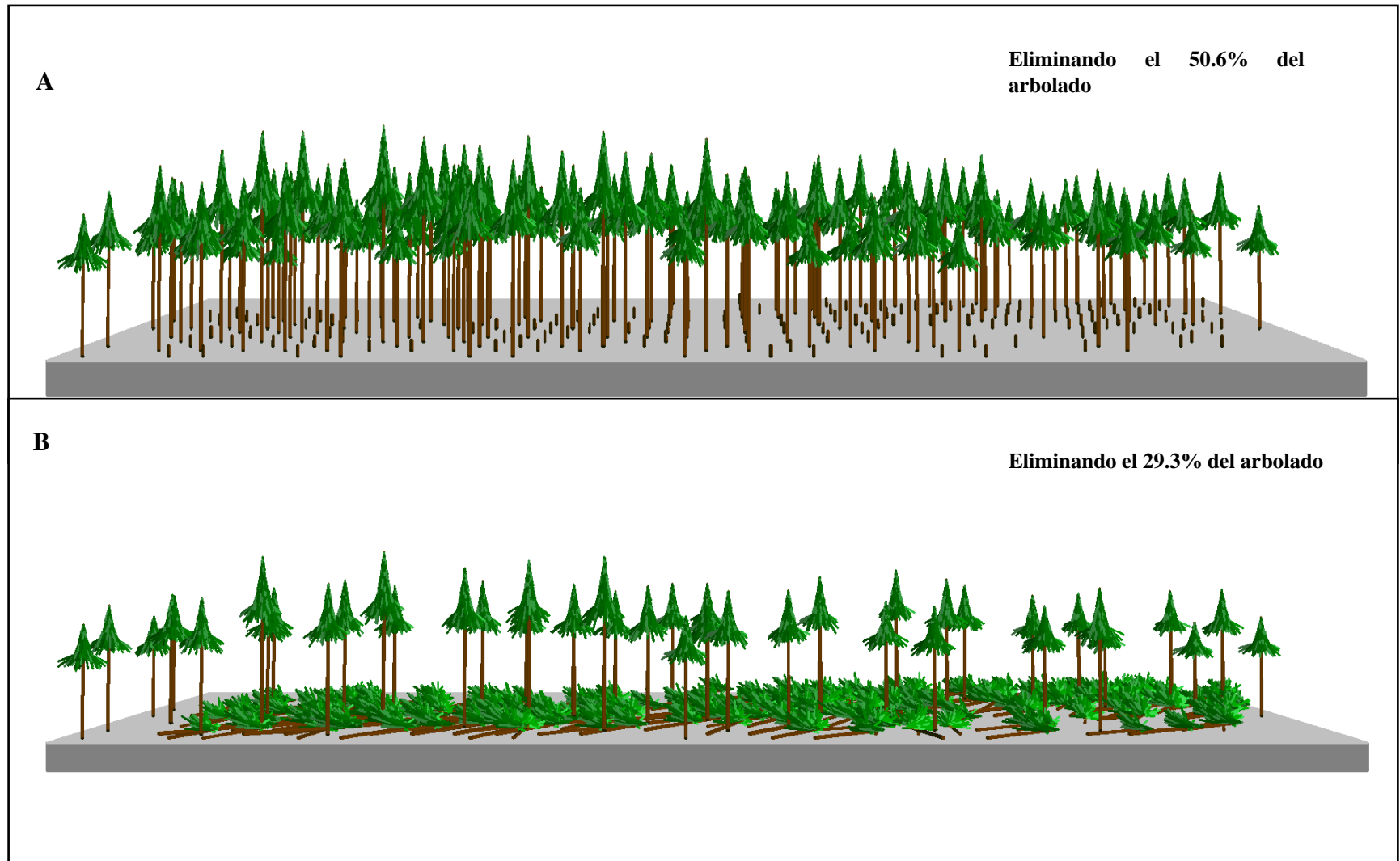


Figura 3. Simulación de aclareos en el ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila. Primer aclareo (A) y segundo aclareo (B).

Caracterización fenotípica de la plantación y diferencial de selección

En cuanto a las características fenotípicas de la población base, las variables que mayor variación presentaron fueron el volumen de Pressler con una media de 0.0349 m^3 , desviación estándar de 0.0201 m^3 y un coeficiente de variación de 57.7%; la rectitud de fuste mostró un valor promedio de 1.9, desviación estándar de 1.24 y un coeficiente de variación de 65.42% y la densidad de la madera un valor promedio de 0.427 gr cm^{-3} , con una desviación estándar de 0.13 y un coeficiente de variación de 31.04%.

Con respecto a las características fenotípicas de la plantación, se encontró que el alto coeficiente de variación en volumen de Pressler se debe a la combinación de diámetro normal y la altura. Estos datos representan una alta variación fenotípica en la capacidad de crecimiento de los árboles en la plantación, por lo tanto existe un potencial elevado para selección de esta población. En cuanto a rectitud del fuste, la variación es muy alta, ligeramente mayor a la encontrada en volumen de Pressler. El valor promedio de esta característica muestra que la mayoría de los árboles presentan fustes rectos y un poco inclinados, existiendo un fuerte potencial para la selección. Se observó un alto potencial para el mejoramiento de la densidad de la madera, con un coeficiente de variación de 31.04%. Al respecto, Balcorta y Vargas (2004) evaluaron el nivel de variación fenotípica en el crecimiento en volumen, la rectitud del fuste y la densidad de la madera, en una plantación comercial de *Gmelina arborea* Robx de tres años de edad, propiedad de la empresa Smurfit Cartón y Papel de México (SCPM) S.A. de C.V., en Escárcega, Camp., donde encontraron que el volumen fue una de las características que presentan mayor variación fenotípica, mayor de 50%.

Después de obtener los valores promedios del diámetro normal, altura total, volumen de Pressler, rectitud del fuste y densidad de la madera de los árboles semilleros seleccionados ($n = 40$) y los valores promedios de la plantación o población base ($n = 259$), se generó el diferencial de selección para cada una de las características de interés económico. Es importante mencionar, que para generar el diferencial de selección se tomó como población base a los árboles que conformaban al ensayo de progenie. Lo anterior, debido a que no se cuenta con información necesaria del bosque al cual pertenecen las familias evaluadas.

Con respecto a al diferencial de selección destaca el volumen de Pressler, en donde el diferencial de selección fue de 0.0205 m^3 , mayor al 50% de la media en la población base. En lo que respecta a la rectitud de fuste, se obtuvo un diferencial muy bajo de 0.047, que equivale a 2.47 % y en la densidad de la madera se obtuvo un diferencial de 0.119 gr cm^{-3} , equivalente al 27.86% con respecto a la media de la población base.

Después de la simulación del diseño del huerto semillero se obtuvo el diferencial de selección, en volumen fue de 0.0205 m^3 , mayor al 50% de la media en la población base, lo que implica que con un valor de heredabilidad 0.324 encontrada por Azamar *et al.*, (2000) en un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* a 8 años de edad, se podría obtener una buena respuesta a la selección en esta característica. Sin embargo, la rectitud de fuste mostró un diferencial muy bajo (0.047), perdiendo rectitud del fuste, aunque muy mínima, ya que mientras mayor sea el valor de rectitud del fuste más inclinados y torcidos estarán los fustes de los árboles. Esta característica generalmente tiene un control genético elevado, lo cual

permitirá obtener una buena respuesta de esta característica. Por otro lado, la densidad de la madera, presentó un diferencial de 0.119 gr cm^{-3} , sin embargo esta característica presenta un valor de heredabilidad que generalmente va de 0.5 a 0.7, lo que implicaría que con un coeficiente de variación alto (31.04%), permitirá continuar con el mejoramiento de esta característica y obtener buenas ganancias. Balcorta y Vargas (2004) encontraron diferenciales de selección contrastantes a los presentados en este estudio, y mayores al 40% con respecto a la población base, donde el volumen presentó un diferencial de selección mayor al 40% con respecto a la población base. Estas diferencias son debido a que Balcorta y Vargas (2004) realizaron la selección en un área mucho más grande a la del presente estudio, con especies y edades diferentes.

CONCLUSIONES

Las variables usadas para la construcción del índice fueron diámetro normal, volumen y altura y explicaron el 87.64 % de la varianza. La aplicación de un aclareo por lo bajo y un aclareo geométrico, mediante dos simulaciones con el SVS, permitieron el diseño de un huerto semillero que incluye los mejores 44 árboles semilleros para obtener semilla mejorada para el sitio donde se encuentra establecido el ensayo y producir planta para reforestar sitios con condiciones ambientales y topográficas similares. El uso del SVS facilitó el diseño del área visualizando la distribución espacial para cada árbol. La densidad de árboles que formarán el huerto semillero está dentro del rango de las densidades utilizadas en otros estudios. La decisión de mantener el mayor número posible de familias, a fin de poseer una alta variabilidad genética y tener la mejor distribución de espacio, llevo a mantener dentro del

diseño del huerto individuos con baja calificación, disminuyendo ligeramente la ganancia genética final proyectada.

BIBLIOGRAFÍA

- Azamar O M, J López U, J J Vargas H, A Plancarte B (2000)** Evaluación de un ensayo de procedencias-progenie de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. *In:* Memorias del primer Congreso Nacional de Reforestación. SEMARNAP – Colegio de Postgraduados Montecillo, Edo. de México. 9 p.
- Bridgwater F E, J T Talbert, S Jahromi (1983)** Index selection for increased dry weight in a young loblolly pine population. *Silvae Genetica* 32: 5-6.
- Balcorta M H, J Vargas H (2004)** Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de Melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Ciencia Forestal* 9 (2):13-19.
- Cerón R J J, J Sahagún C (2005)** Un índice de selección basado en componentes principales. *Agrociencia* 39: 667 – 677.
- Clausen K E (1990)** Producción de semillas forestales genéticamente mejoradas. *In:* Memoria Sobre Mejoramiento Genético y Plantaciones Forestales. Eguiluz P T, A Plancarte B (Editores). Chapingo, México. pp. 78-88.
- Farfán V E G, J Jasso M, J López U, J J Vargas H, C Ramírez H (2002)** Parámetros genéticos y eficiencia de las selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(3):239 – 246.
- García E (1987)** Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 245 p.
- Harrand L (2002)** Utilización de “Valores de Cría” Para la habilitación de un huerto semillero de progenies. Proyecto de Desarrollo Forestal – PPMPM Eucaliptos en Mesopotamia. EEA INTA Concordia. Argentina. 5 p.

- Granhof J (1991)** Mass production of improved material. Seed orchards. Lecture note No. D-8. Danida Forest Seed Centre. Denmark. 26 p.
- Ladrach W, M Gutiérrez, P Arboleda, M H García (1977)** Establecimiento de un huerto semillero de *Cupressus lusitanica* Mill. Informe de Investigación No. 25. Smurfit Cartón Colombia S.A. Investigación Forestal. Cali, Colombia. 16 p.
- López U J, J Jasso M, J J Vargas H, C Ayala S (1993)** Variación de características morfológicas en conos y semillas de *Pinus greggii*. Agrociencia 3(1): 81-84.
- McGauhuey R J (2000)** Stand Visualization System. Versión 3.36. Pacific Northwest Research Station. USDA-FS.Washington. 141 p.
- Park Y S, J D Simpson, D P Fowler, E K Morgenstern (1989)** A selection index with desired gains to rogue jack pine seedling seed orchards. Information report M-X-176. Forestry Canada – Maritimes Region. New Brunswick. Canadá. 18 p.
- Ramírez H C, J J Vargas H, J Jasso M, G Carrillo C, H Guillén A (1997)** Variación isoenzimática de diez poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. Agrociencia 31:223-230.
- Romahn de la V C F (1991)** Relascopeía. Serie de apoyo académico No. 43. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 133 p.
- SAS Institute Inc (1999)** SAS/STAT Guide for personal computers. Version 6. Cary, NC. USA. 518 p.
- Schmidt L (1993)** Seed Orchards. Guidelines on establishment and management practices. Undp/FAO regional project on improved productivity of man-made forests through application of technological advances in tree breeding and propagation (ras/91/004). Philippines. 103p.

- Torres J (2000)** Evaluación genética y económica de dos ensayos de progenie de *Pinus radiata* D. Don a base de un índice de selección multicriterio. Ciencias Forestales. Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 14(1-2):1-7.
- Valencia M S, J Vargas H (1997)** Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. Madera y Bosques 3(1):81-87.
- Valencia M S, J J Vargas H (2001)** Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula*. Agrociencia 35: 109-120.
- Zobel B J, J T Talbert (1988)** Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Limusa. México. 545 p.

**DISEÑO DE HUERTO SEMILLERO DE *Pinus greggii* Engelm. EN JAMÉ,
ARTEAGA, COAHUILA**

**Benito N. Gutiérrez Vázquez, Eladio H. Cornejo Oviedo, Alejandro Zermeño González,
Salvador Valencia Manzo, Rosalinda Mendoza Villarreal**

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en un ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el predio particular Los Tarihuanes, en Arteaga, Coah. El objetivo fue diseñar un huerto semillero mediante la simulación de aclareos silvo – genéticos y la selección de árboles mediante un índice de selección. Para determinar el índice de selección se realizó un análisis de componentes principales (CP), hasta reducir de trece a seis variables alcanzando a explicar el 91.98% de la varianza con los dos primeros CP. El índice de selección quedó integrado por las variables: diámetro basal, diámetro normal, volumen de Pressler, altura total, el diámetro de copa y el diámetro de ramas. El huerto semillero se diseñó mediante el Software Stand Visualization Sistem (SVS), dejando 44 árboles en 0.35 ha, con una densidad de 97 árboles ha⁻¹.

Palabras clave: *Pinus greggii*, componentes principales, índice de selección, huerto semillero.

ABSTRACT

The study was conducted in a progeny test of *Pinus greggii* Engelm. established Los Tarihuanes, Arteaga, Coah. The objective was to design a seed orchard by simulating a silvo -

genetic thinning and a tree selection through a selection index. To determine the selection index a principal components (CP) analysis was conducted. The CP analysis reduced from thirteen to six variables explaining 91.98% of the variance with the first two CP. The selection index was integrated by basal diameter, normal diameter, volume of Pressler, total height, canopy diameter, and diameter of branches. The seed orchard was designed using the Stand Visualization System (SVS). The seed orchard consisted of 34 trees in 0.35 ha, with a tree density of 97 tree ha⁻¹.

Key words: *Pinus greggii*, main components, selection index, seed orchard.

INTRODUCCIÓN

En México, las prácticas de mejoramiento genético forestal se han orientado al cultivo en bosques naturales con arbolado que presenta las mejores características fenotípicas. Se han aplicado diferentes sistemas y tratamientos silvícolas que, en los mejores casos, han asegurado únicamente la regeneración de los bosques, sin la certeza de que el renuevo presente una ganancia genética efectiva (Azamar *et al.*, 2000). Así como también, el suministro insuficiente de semilla es visto a menudo como el principal factor limitante para el desarrollo de los programas de plantación (Granhof, 1991).

Pinus greggii Engelm. es una especie de rápido crecimiento y precoz en su floración, además de que la mayoría de sus poblaciones se encuentran seriamente amenazadas por factores naturales y antropogénicos, provocando el aislamiento y la reducción de sus poblaciones (López *et al.*, 1993). Por otro lado, al realizar un estudio de variación

isoenzimática en diez poblaciones naturales de *Pinus greggii*, seis ellas del Norte, incluida la población de Los Lirios, Arteaga, Coah. Ramírez *et al.*, (1997) encontraron que existe una reducción de la diversidad genética de esta especie, debido a la tendencia de los alelos hacia el monomorfismo y a que las poblaciones de la especie se encuentren en áreas restringidas y aisladas entre sí. También indican que muchas de estas poblaciones muestran una alta prioridad para la conservación de genes y la existencia de altas diferencias entre poblaciones y una baja variabilidad dentro de poblaciones.

En los programas de mejoramiento genético, la información de la primera generación de los individuos de la población es puramente visual. Sin embargo, a medida que se avanza en el programa, es indispensable utilizar metodologías de evaluación más eficientes que la selección masal (Torres, 2000). Una de esas metodologías es el índice de selección, el cual presenta una gran ventaja en el mejoramiento genético, ya que es de gran ayuda para seleccionar genotipos basándose en características fenotípicas y que permite seleccionar características múltiples (Zobel y Talbert, 1988). Un índice de selección a través del método multivariados basado en componentes principales (CP), involucra el primer CP que determina la proporción y vector característico de los valores fenotípicos de los caracteres objeto de estudio. Los elementos del vector característico del primer componente determina la proporción con que los caracteres respectivos contribuyen al nuevo índice (Cerón y Sahagún, 2005).

El objetivo del estudio fue diseñar un huerto semillero, mediante un plan de simulación de aplicación de aclareos y la selección de arboles a través de un índice de selección en un

ensayo de progenie de *Pinus greggii* var. *greggii* establecido en el predio particular Los Tarihuanes, en Arteaga, Coah.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área experimental

En enero de 1994 se estableció un ensayo en el predio particular Los Tarihuanes, Arteaga, Coah. El área se encuentra entre las coordenadas 25° 22' 13" de latitud norte y 100° 36' 22" de longitud oeste, con una altitud aproximada de 2400 m.s.n.m. Se utilizó un diseño en bloques completamente al azar con cuatro bloques colocados perpendicularmente respecto de la pendiente, con cuatro plantas por parcela. El ensayo de la progenie se constituyó de 18 árboles maternos procedentes de Los Lirios, Arteaga, Coah., y un testigo procedente del Rincón del Molino, Cerro viejo, Bella Unión, Coah. La edad de las plantas al momento de la plantación fue de 40 a 42 meses y el testigo de 48 meses, se plantó en cepa común con una distribución en tresbolillo con 3 m de espaciamiento. Se utilizaron 283 plantas útiles en total y 76 de borde. De acuerdo con los datos registrados en la estación meteorológica No. 05-033, San Antonio de las Alazanas, la fórmula climática del área, es: Cb (x') (e') g, que corresponde a un clima templado; y de acuerdo a la estación meteorológica de Jamé, se registra una temperatura media anual de 12.9 °C, con una precipitación media anual de 428.6 mm (García, 1987).

Variables evaluadas

Las variables que se evaluaron para construir el índice de selección fueron: la altura total del árbol, el diámetro basal y el diámetro normal (a 1.30 metros a partir del suelo). Para el cálculo de los crecimientos relativos se consideró la altura total inicial y el diámetro basal inicial medidos en 1992. La altura total, el diámetro basal y el diámetro normal finales se evaluaron en diciembre de 2006.

También se midió el diámetro de copa, el diámetro de las tres ramas más gruesas que se encontraban en cada uno de los tres primeros verticilos por arriba del diámetro normal, el ángulo de inclinación de las ramas con respecto al fuste. Además, se calificó la rectitud del fuste usando números del uno al cuatro como sigue: el 1 para árboles rectos, 2 para árboles inclinados, 3 para árboles torcidos y 4 para árboles bifurcados. Se realizó un conteo directo desde la base del árbol hasta la yema apical, para las variables número de verticilos y número de ramas por verticilo, considerando como verticilo todos aquellos que tenían dos o más ramas. En el caso de las ramas por verticilo se obtuvo un promedio de las ramas de cada verticilo.

Se calcularon los crecimientos relativos en altura total (CRA) y en diámetro basal (CRDB), ambas mediante la ecuación 1.

$$CRA = \frac{\ln A_f - \ln A_i}{T_f - T_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: CRA = Crecimiento relativo en altura; Ln = Logaritmo natural; A_f = Altura final; A_i = Altura inicial; T_f = Tiempo final (20 de diciembre de 2006); T_i = Tiempo inicial (1992).

El volumen de Pressler (Romahn, 1991) se calculó con la ecuación 2.

$$V = \frac{2}{3} * (A * h) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: V= Volumen de Pressler (m³); A= Área seccional transversal del tronco a 1.30 m de altura (m²); h = Altura de Pressler = d + 1.30 m +0.65 m; d =Distancia entre diámetro normal y la sección con diámetro igual a la mitad del diámetro normal (m).

Se estimó un cociente de ramas (Cocirama) que se obtuvo con el diámetro a la base del árbol y el promedio del diámetro de las ramas más gruesas que se encontraban en los tres verticilos por arriba del diámetro normal (Ecuación 3).

$$\text{Cocirama} = \frac{DB}{D_{promr}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: Cocirama = cociente de ramas; DB = Diámetro basal; D_{promr} = Diámetro promedio de las ramas.

Todas las variables se estandarizaron con la finalidad de cumplir con el procedimiento de los análisis multivariados (SAS Institute Inc., 1999), para la estandarización del ángulo de las ramas se realizó una transformación angular y para el resto de las variables se realizo con la ecuación 4.

$$Z_{ij} = \left[\frac{X_{ij}}{S_j} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: Z_{ij}= Nuevo valor estandarizado; X_{ij}= Valor de la observación *i* en la variable *j*; S_j= Desviación típica o estándar de los valores de la variable *j*.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de componentes principales con el Statistical Analysis System (SAS) versión 9.1, utilizando el procedimiento PROC PRINCOMP. El procesamiento de los datos se realizó mediante un proceso interactivo hasta reducir de trece a seis variables (diámetro basal, diámetro normal, diámetro de copa, volumen de Pressler, altura total y el diámetro de ramas) alcanzando a explicar el 91.98% de la varianza con los dos primeros CP. Para agrupar los árboles de acuerdo a las variables resultantes de la reducción de los CP, se utilizó el procedimiento PROC CLUSTER de SAS para lo cual se probaron los métodos: Average, Twostage K=3, Ward Pseudo, Density K = 3, Single y Centroid. Para seleccionar el mejor método se buscó el grupo que presentara los valores más altos del criterio cúbico de agrupamiento (CCA) y de la pseudo F estadística. Cada árbol se identificó con un código diferente para ubicarlo en que grupo se encontraba.

La construcción del índice para la selección de los mejores árboles se creó sobre la base de la correlación entre las variables dasométricas y de forma de copa. Se eliminaron las variables que no presentaran una alta correlación dentro de los CP que mejor explicaran la variación total, seleccionando solamente las variables que mejor se asociaran dentro de los CP.

Simulación de aclareos

Una vez obtenido el índice de selección se realizó la validación de los árboles en campo, verificando cuales fueron las variables de los árboles, por las que se habían integrado a cada grupo. En la validación se observaron espacios dentro del ensayo debido a la mortalidad (38.9%), además muchos árboles aún no tienen un tallo fuerte, por lo que se consideró dejar

árboles no selectos de protección en los lugares donde los vientos ocurren con mayor frecuencia. Para la simulación de los aclareos, se utilizó el sistema de visualización de rodales (SVS) Versión 3.36 (McGaughey, 2000) con el cual se diseñó el huerto semillero, representando actualmente el ensayo de progenie y cada una de la simulación de los aclareos. Los criterios que se consideraron en la simulación fueron, el aclareo geométrico, el espaciamiento y la representatividad de las familias; así como las variables del índice de selección y el micrositio.

Caracterización fenotípica y diferencial de selección

Con los datos del diámetro normal, la altura total, el volumen de Pressler, la rectitud del fuste y la densidad de la madera, se determinó la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Además se determinó el diferencial de selección (Zobel y Talbert, 1988), considerando las variables anteriores (Ecuación 5).

$$s = \bar{X}_s - S \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde: S = Diferencial de selección; \bar{X}_s = Media de individuos seleccionados; \bar{X} = Media de la población base.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de componentes principales

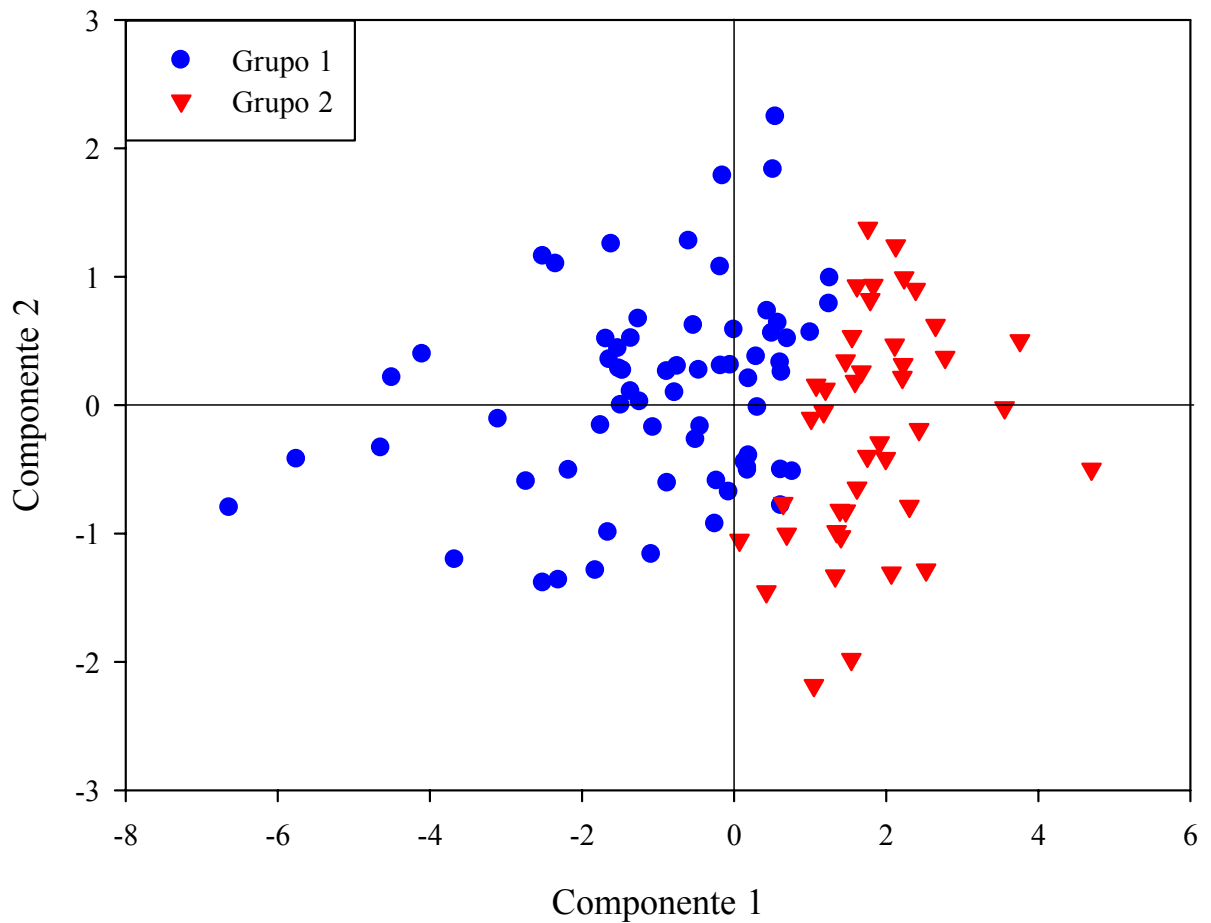
Los componentes principales (CP) 1 y 2 explicaron el 92.0% de la variación total; además de su contribución relativa individual en cada CP (Cuadro 2). Las variables que presentaron mayor contribución relativa a la variación total fueron las variables dasométricas.

El primer CP explicó el 80.5%, donde las variables diámetro basal, diámetro normal y el volumen de Pressler, presentaron una mayor correlación con el componente; además las variables altura total, diámetro de copa y el diámetro de ramas presentaron una fuerte correlación, pero menor que las variables antes mencionadas dentro del primer CP (Cuadro 2). El índice de selección quedó integrado por las variables señaladas.

Cuadro 2. Eigenvalores de las variables dasométricas y de arquitectura de copa en los dos primeros componentes principales en el ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en Los Tarihuanes, Arteaga, Coahuila.

Variable	Componente principal (Varianza explicada)	
	1 (80.54%)	2 (11.44%)
Diámetro basal	0.4383	-0.0570
Diámetro normal	0.4434	-0.1687
Volumen de Pressler	0.4392	-0.2475
Altura total	0.3875	-0.5041
Diámetro de copas	0.3823	0.4345
Diámetro de ramas	0.3490	0.6811

Se encontró que el método que mejor agrupaba los árboles de acuerdo al índice de selección fue el Ward pseudo con dos grupos, de acuerdo a los valores más altos del criterio cubico de agrupamiento (CCA)= 14.3 y de la pseudo F con un valor de 1069; definiendo dos grupos (Figura 4). Los árboles del grupo 2 tuvieron valores promedios más altos que los de grupo 1, en variables como diámetro basal (17.3 vs 12.8), diámetro normal (12.2 vs 8.3), altura total (7.01 vs 5.3) y volumen de Pressler (0.05 vs 0.02). El grupo 1, se integró de acuerdo al diámetro basal, diámetro normal, diámetro de copa y volumen de Pressler. En cambio, el grupo 2 se agrupó de acuerdo a la altura con correlación negativa y con el diámetro de ramas, presentando correlación positiva (Figura 4).



* El grupo 1, está formado por los árboles más pequeños y el grupo 2, por los árboles más grandes y los cuales son candidatos a ser selectos como árboles semilleros de acuerdo al índice de selección.

Figura 4. Dispersión de los árboles con base en los componentes principales 1 y 2, obtenido de las variables de arquitectura de copa y dasométricas en el ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., en Los Tarihuanes, Arteaga, Coahuila.

El índice de selección formado por el diámetro basal, diámetro normal, volumen de Pressler, altura total, diámetro de copa y diámetro de ramas, permitieron seleccionar 34 árboles y dejar una densidad de 97 árboles ha⁻¹; siendo el primer componente quien mejor explicó la contribución de estas variables, lo cual reafirma lo encontrado por Cerón y Sahagún (2005).

Para selección de árboles de *Cupressus lusitanica* Mill. para el establecimiento de un huerto semillero en Colombia, se utilizó la resistencia a plagas y enfermedades, volumen del árbol, rectitud del fuste, forma de la copa y calidad de la madera (Ladrach *et al.*, 1977).

En la construcción de un índice de selección para incrementar el peso seco de la madera en *Pinus taeda* Schl. *et* Cham., en una prueba de progenie en el suroeste de Georgia, Bridgwater *et al.* (1983) encontraron que la altura, diámetro normal y el volumen, permitía un 17% de ganancia. En la construcción de un índice de selección para *Pinus banksiana* Lamb. en una prueba de progenies, establecida en cuatro localidades de Brunswick, se utilizó la altura, el diámetro, el volumen y la densidad de la madera (Park *et al.*, 1989). Mientras que para la conversión de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* Engelm. a huerto semillero en el Estado de México, se seleccionaron los árboles con base a la rectitud, grosor y número de ramas (Azamar *et al.*, 2000).

Al respecto, para la construcción de un índice de selección, en un ensayo de progenie de *Pinus radiata* D. Don, Torres (2000) utilizó el diámetro normal y altura, variables utilizadas en el índice construido en este trabajo. Por otra parte, en un estudio efectuado en una prueba de progenies de *P. patula* Schiede de seis años de edad, establecida en Zacualpan, Ver., Valencia y Vargas (2001) utilizaron variables de crecimiento como altura, diámetro, volumen y biomasa del tronco. En la transformación de un ensayo de progenie a huerto semillero de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden establecido en Argentina, los criterios de selección fueron dominancia en altura, diámetro normal y volumen, (Harrand, 2002). Por otro lado, al evaluar

la eficiencia de selección temprana de *Pinus ayacahuite* Ehren var. *Ayacahuite*, Farfán *et al.* (2002) utilizaron el diámetro a la base, el diámetro normal y la altura.

Simulación de aclareos

Para llevar a cabo el diseño del huerto semillero, se consideró la representatividad de las familias para obtener mayor variación, lo que consistió en no dejar en una misma parcela, árboles de la misma familia y dejando el mayor número de familias representadas posibles; al final se logró que 12 de las 18 familias más el testigo, quedaran representadas dentro del huerto semillero, donde la familia 38 fue la que mejor representada con 6 individuos, así como la familia 44 con 4 individuos y las familias 8, 17, 18, 19 y la 42 con 3 individuos cada una. Así como también se dejó árboles en los espacios grandes, para aprovechar la superficie del ensayo. Se realizaron aclareos geométricos de tal manera que existiera suficiente espacio para el movimiento de maquinaria para el futuro manejo del huerto. Al realizar la simulación del primer aclareo, llevando a cabo un aclareo por lo bajo, se eliminarán 62 árboles, de esta forma se eliminará el 56.4% del total de la población superviviente, dejando un total de 48 árboles en pie, con una densidad de 137 árboles ha⁻¹. En la simulación del segundo aclareo, se realizó en forma geométrica, donde se eliminarían 14 árboles, eliminando el 12.7% con relación al total de la población, dejando un total de 34 árboles en pie en 0.35 ha, con una densidad de 97 árboles ha⁻¹ (Figuras 5 y 6).

El huerto se diseñó con 34 árboles en 0.35 ha, con una densidad de 97 árboles ha⁻¹, para permitir la operación mecánica por tractores y otras máquinas, para el manejo futuro del

huerto de acuerdo con (Clausen, 1990) y (Schmidt, 1993). En el establecimiento de un huerto semillero en Colombia de *Cupressus lusitanica* se dejó una densidad de 190 árboles ha⁻¹ (Ladrach *et al.*, 1977). Mientras que para la conversión de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* a huerto semillero en el Estado de México, fue una densidad de 339 árboles ha⁻¹ (Azamar *et al.*, 2000). En la transformación de un ensayo de progenies transformado en huerto semillero de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden establecido en Argentina, se seleccionaron 265 árboles más (Harrand, 2002). Zobel y Talbert (1988) recomiendan una densidad de 80 a 150 árboles ha⁻¹. Schmidt (1993) recomienda una densidad de 100 árboles ha⁻¹.

Caracterización fenotípica de la plantación y diferencial de selección

En cuanto a las características fenotípicas de la población base, las variables que mayor variación presentaron fueron el volumen de Pressler con una media de 0.0304 m³, desviación estándar de 0.0172 m³ y un coeficiente de variación de 56.5%; la rectitud de fuste mostró un valor promedio de 1.56, desviación estándar de 1.14 y un coeficiente de variación de 73.3%.

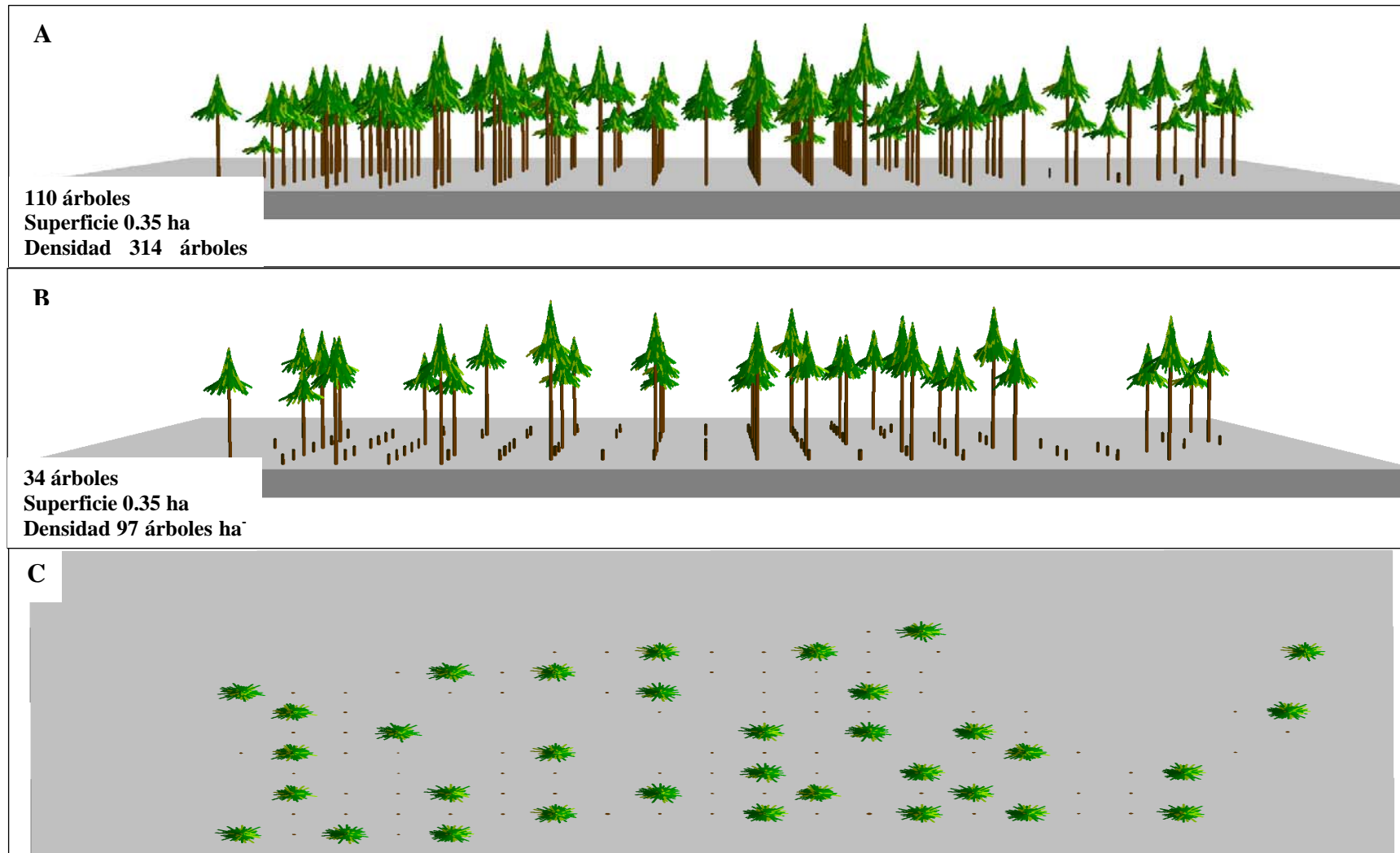


Figura 5. Ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en en Los Tarihuanes, Arteaga, Coahuila. (A), Huerto semillero diseñado (B) y vista de las copas del huerto semillero diseñado (C).

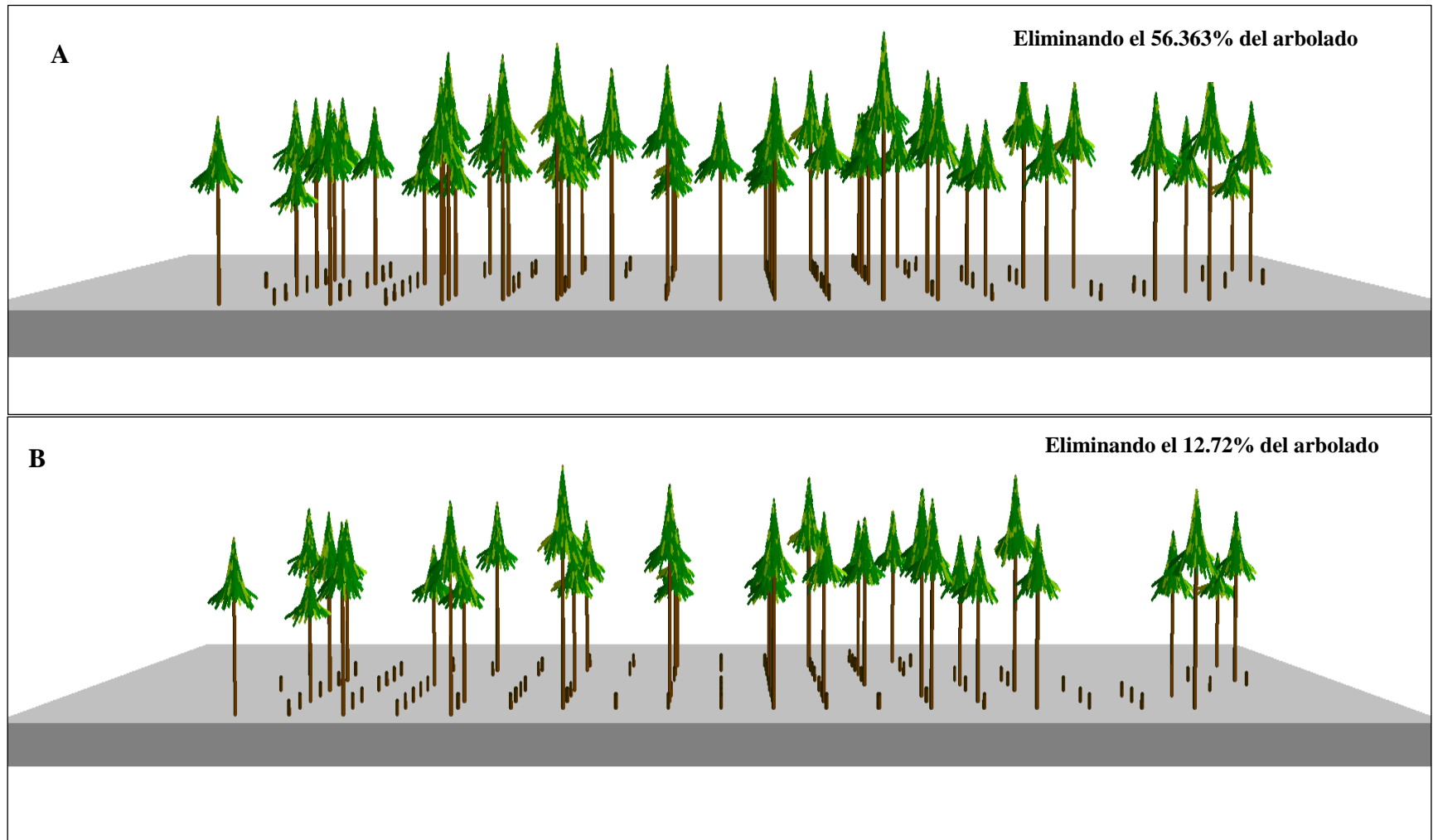


Figura 6. Simulación de aclareos en el ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., en Los Tarihuanes, Arteaga, Coahuila. Primer aclareo (A) y segundo aclareo (B).

Con respecto a las características fenotípicas de la plantación, se encontró que el alto coeficiente de variación en volumen de Pressler se debe a la combinación de diámetro normal y la altura. Estos datos representan una alta variación fenotípica en la capacidad de crecimiento de los árboles en la plantación, por lo tanto existe un potencial elevado para selección de esta población. En cuanto a rectitud del fuste, la variación es muy alta, mayor a la encontrada en volumen de Pressler. El valor promedio de esta característica muestra que la mayoría de los árboles presentan fustes rectos y un poco inclinados, existiendo un fuerte potencial para la selección. Al respecto Balcorta y Vargas (2004) evaluaron el nivel de variación fenotípica en el crecimiento en volumen, la rectitud del fuste y la densidad de la madera, en una plantación comercial de *Gmelina arborea* Robx de tres años de edad, propiedad de la empresa Smurfit Cartón y Papel de México (SCPM) S.A. de C.V., en Escárcega, Camp., donde encontraron que el volumen fue una de las características que presentan mayor variación fenotípica, mayor de 50%.

Después de obtener los valores promedios del diámetro normal, altura total, volumen de Pressler y rectitud del fuste de los árboles semilleros seleccionados ($n = 34$) y los valores promedios de la plantación o población base ($n = 110$), se generó el diferencial de selección para cada una de las característica de interés económico. Sin embargo, para generar el diferencial de selección se tomó como población base a los árboles que conformaban al ensayo de progenie. Lo anterior, debido a que no se cuenta con información necesaria del bosque al cual pertenecen las familias evaluadas.

Después de la simulación del diseño del huerto semillero se obtuvo el diferencial de selección, en volumen de Pressler fue de 0.01 m^3 , equivalente 28.8% de la media en la población base, lo que implica que con un valor de heredabilidad 0.324 encontrada por Azamar *et al.*, (2000) en un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* a 8 años de edad, se podría obtener una respuesta aceptable a la selección en esta característica. La rectitud de fuste mostró un diferencial muy bajo (-0.06), que equivale a 4.2 % con respecto a la media de la población base. Se gana rectitud del fuste, aunque muy mínima, ya que mientras menor sea el valor de rectitud de los fustes más rectos estarán los fustes de los árboles, esta característica generalmente tiene un control genético elevado, lo cual permitirá obtener una buena respuesta de esta característica. Balcorta y Vargas (2004) encontraron diferenciales de selección contrastantes a los presentados en este estudio, y mayores al 40% con respecto a la población base, donde el volumen presentó un diferencial de selección mayor al 40% con respecto a la población base. Estas diferencias son debido a que Balcorta y Vargas (2004) realizaron la selección en un área mucho más grande a la del presente estudio, con especies y edades diferentes.

CONCLUSIONES

Las variables usadas para la construcción del índice fueron diámetro normal, diámetro basal, diámetro de copa, volumen de Pressler, altura y diámetro de ramas, explicaron el 92.0 % de la varianza. La aplicación de un aclareo por lo bajo y un aclareo geométrico, mediante simulaciones con el SVS, permiten el diseño de huertos semilleros para obtener semilla mejorada para el sitio donde se encuentra establecido el ensayo y producir planta para

reforestar sitios con condiciones ambientales y topográficas similares. El uso del SVS facilitó el diseño del área visualizando la distribución espacial para cada árbol. La densidad de árboles que formarán el huerto semillero está dentro del rango de las densidades utilizadas en otros estudios. La decisión de mantener el mayor número posible de familias, a fin de poseer una alta variabilidad genética y tener la mejor distribución de espacio, llevo a mantener dentro del diseño del huerto individuos con baja calificación, disminuyendo ligeramente la ganancia genética final proyectada.

BIBLIOGRAFÍA

- Azamar O M, J López U, J J Vargas H, A Plancarte B (2000)** Evaluación de un ensayo de procedencias-progenie de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. *In:* Memorias del primer Congreso Nacional de Reforestación. SEMARNAP – Colegio de Postgraduados Montecillo, Edo. de México. 9 p.
- Bridgwater F E, J T Talbert, S Jahromi (1983)** Index selection for increased dry weight in a young loblolly pine population. *Silvae Genetica* 32: 5-6.
- Balcorta M H, J Vargas H (2004)** Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de Melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Ciencia Forestal en México* 9 (2):13-19.
- Cerón R J J, J Sahagún C (2005)** Un índice de selección basado en componentes principales. *Agrociencia* 39. 667 – 677.
- Clausen K E (1990)** Producción de semillas forestales genéticamente mejoradas. *In:* Memoria Sobre Mejoramiento Genético y Plantaciones Forestales. Eguiluz P T, A Plancarte B (Editores). Chapingo, México. pp. 78-88.
- Farfán V E G, J Jasso M, J López U, J J Vargas H, C Ramírez H (2002)** Parámetros genéticos y eficiencia de las selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(3):239 – 246.
- García E (1987)** Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 245 p.

- Harrand L (2002)** Utilización de “Valores de Cría” Para la habilitación de un huerto semillero de progenies. Proyecto de Desarrollo Forestal – PPMPPM Eucaliptos en Mesopotamia. EEA INTA Concordia. Argentina. 5 p.
- Granhof J (1991)** Mass production of improved material. Seed orchards. Lecture note No. D-8. Danida Forest Seed Centre. Denmark. 26 p.
- Ladrach W, M Gutiérrez, P Arboleda, M H García (1977)** Establecimiento de un huerto semillero de *Cupressus lusitanica* Mill. Informe de Investigación No. 25. Smurfit Cartón Colombia S.A. Investigación Forestal. Cali, Colombia. 16 p.
- López U J, J Jasso M, J J Vargas H, C Ayala S (1993)** Variación de características morfológicas en conos y semillas de *Pinus greggii*. Agrociencia 3(1): 81-84.
- McGauhuey R J (2000)** Stand Visualization System. Versión 3.36. Pacific Northwest Research Station. USDA-FS.Washington. 141 p.
- Park Y S, J D Simpson, D P Fowler, E K Morgenstern (1989)** A selection index with desired gains to rogue jack pine seedling seed orchards. Information report M-X-176. Forestry Canada – Maritimes Region. New Brunswick. Canadá. 18 p.
- Ramírez H C, J J Vargas H, J Jasso M, G Carrillo C, H Guillén A (1997)** Variación isoenzimática de diez poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. Agrociencia 31:223-230.
- Romahn de la V C F (1991)** Relascopeía. Serie de apoyo académico No. 43. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México. 133 p.
- SAS Institute Inc (1999)** SAS/STAT Guide for personal computers. Versión 6. Cary, NC. USA. 518 p.

- Schmidt L (1993)** Seed Orchards. Guidelines on establishment and management practices. Undp/FAO regional project on improved productivity of man-made forests through application of technological advances in tree breeding and propagation (ras/91/004). Philippines. 103p.
- Torres J (2000)** Evaluación genética y económica de dos ensayos de progenie de *Pinus radiata* D. Don a base de un índice de selección multicriterio. Ciencias Forestales. Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 14(1-2):1-7.
- Valencia M S, J Vargas H (1997)** Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. Madera y Bosques 3(1):81-87.
- Valencia M S, J J Vargas H (2001)** Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula*. Agrociencia 35: 109-120.
- Zobel B J, J T Talbert (1988)** Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Limusa. México. 545 p.

VULNERABILIDAD DEL XILEMA A LA CAVITACION EN *Pinus greggii* Engelm.

EN ARTEAGA, COAHUILA

Benito N. Gutiérrez Vázquez, Eladio H. Cornejo Oviedo, Alejandro Zermeño González,

Rosalinda Mendoza Villarreal, Salvador Valencia Manzo

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en un ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Arteaga, Coah. Para evaluar la vulnerabilidad del xilema a la cavitación, se obtuvieron las curvas de vulnerabilidad hidráulica para dos familias (19 y 21) de *Pinus greggii* var. *greggii*, también se construyó una curva para representar a la especie, utilizando los datos de ambas familias. En el análisis de comparación de medias para los valores de **a** (β_0 , rango de potenciales hídricos sobre el cuál la conductividad se pierde) y **b** (β_1 , potencial hídrico correspondiente a 50% de pérdida de conductividad) entre las familias 19 y 21, no se encontraron diferencias significativas. Tampoco se encontraron diferencias significativas en la eficiencia hidráulica y en la conductividad máxima, quizás se deba a la baja variabilidad que existe dentro de poblaciones de *Pinus greggii* (Ramírez *et al.*, 1997) y que las familias usadas en el presente estudio han sido seleccionados para otras propiedades y no por las características hidráulicas. Implicando que el evento de cavitación en la columna de agua de xilema, se inicia a potenciales hídricos similares en ambas familias. *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* presentó una vulnerabilidad ligeramente mayor que otras pináceas reportadas.

Palabras clave: *Pinus greggii*, cavitación del xilema, conductividad hidráulica, eficiencia hidráulica.

ABSTRACT

The study was conducted in a progeny test of *Pinus greggii* Engelm. established at the Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Arteaga, Coah. To evaluate the vulnerability of xylem to cavitation, the hydraulic vulnerability curves were constructed for two families (19 and 21) of *Pinus greggii* var. *greggii*, also a curve constructed to represent the species was determined, using the data from both families. The mean comparison for the values of a (β_0) y b (β_1) between the families 19 and 21, no showed significance differences. There was a not significant difference in the hydraulic efficiency and the maximum conductivity. This could be due to the low natural variability within *Pinus greggii* populations and families used in this study which were selected for other properties rather than for hydraulic characteristics. This implied that cavitation event in the xylem column water starts a similar water potential in both families. *Pinus greggii* Engelm. presented a slightly higher vulnerability to cavitation than other pinaceas species.

Key words: *Pinus greggii*, xylem cavitation, hydraulic conductivity, hydraulic efficiency.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es una razón urgente para conservar una gama de recursos genéticos en las especies comerciales. Los modelos climáticos proyectan hasta un aumento de 5°C en la temperatura global en los próximos 50 años como resultado del “efecto de invernadero”. En episodios previos de calentamiento, las especies forestales y las poblaciones dentro de las especies se movieron hacia mayores elevaciones. Para mantener la productividad en un clima más cálido se tendría que mover poblaciones de menores a mayores elevaciones. Con base en la ley de Hopkins, la temperatura disminuye cerca de 1.4°C por cada 305 m de aumento en elevación. Por lo tanto, para el clima proyectado dentro de 50 años, se tendría que plantar sitios con fuentes de semilla de elevaciones 550 m más bajas (Vargas *et al.*, 2004).

Uno de los mayores problemas de la agricultura a lo largo de toda la historia ha sido la sequía. Por lo tanto, para los mejoradores genéticos, la resistencia a la sequía siempre ha sido uno de los objetivos más importantes y es uno de los mayores retos por resolver. Es importante que la evaluación de las nuevas líneas deba ser realizada en los ambientes y con los estreses con los que se enfrentarán dichas nuevas variedades (Herralde, 2000).

El transporte de agua a las hojas depende en mantener intacta la columna de agua en el xilema de la raíces a los tallos, debido a que la vía o sendero hidráulico bajo tensión creciente durante la transpiración, es vulnerable a la cavitación (Tyree y Sperry, 1989). Una consecuencia inmediata de la cavitación del xilema es la reducción de la fotosíntesis y el crecimiento (Sperry y Pockman, 1993). El vínculo directo entre el transporte de agua

sostenido y la supervivencia de la planta y el crecimiento sugiere que puede haber una fuerte selección para la evolución de alta resistencia a la cavitación del xilema. A pesar de los esfuerzos para la selección para favorecer la alta resistencia a la cavitación, todavía existe una considerable variación inter-específica en la resistencia de los árboles a la cavitación del xilema inducida por estrés hídrico (Hafiz *et al.*, 2004).

Desde 1988 se han elaborado curvas de vulnerabilidad hidráulicas para numerosas especies (Tyree y Ewers, 1996) y para algunos materiales clonales (Neufeld *et al.*, 1992). La hipótesis de inyección de aire (Zimmermann, 1983) sugiere que las burbujas de aire se desarrollan a través de los poros dentro de las membranas de las punteaduras separando los conductos del xilema llenos de aire y agua. Se ha sugerido que la resistencia del xilema a la cavitación puede ser la característica más importante que determina la tolerancia a la sequía en plantas (Tyree y Ewers, 1991).

La cavitación se refiere al cambio abrupto del estado del agua dentro del xilema, de un estado líquido estable bajo tensión a estado de vapor. La cavitación inducida por estrés hídrico es el proceso por el cual las burbujas de aire son aspiradas a través de los inter-conductos de las membranas de las punteaduras cuando la tensión del xilema excede un valor crítico, resultando la ruptura de la columna de agua (Jarbeau *et al.*, 1995). La cavitación podría tener un papel importante en determinar la distribución de plantas dentro y entre tipos de hábitat (Pockman y Sperry, 2000). El método de inyección de aire ha sido verificado con respecto al método estándar de deshidratación para varias especies, incluyendo coníferas (Sperry y Tyree, 1990; Cochard, 1992; Sperry y Ikeda, 1997).

Pinus greggii Engelm., es una especie de rápido crecimiento y la mayoría de sus poblaciones se encuentran seriamente amenazadas por factores naturales y antropogénicos, provocando el aislamiento y la reducción de sus poblaciones (López *et al.*, 1993). Así como también ha mostrado altas tasas de crecimiento en altura y diámetro en ensayos genéticos o de especies (Castellanos y Ruíz, 1993; López *et al.*, 1999; Salazar, 1999), así como un gran potencial para adaptarse a condiciones limitantes de humedad (López, 1990). Han encontrado diferencias en conos, semillas y acículas (Donahue y López-Upton, 1999), separando a *P. greggii* en dos variedades taxonómicas: var. *greggii* Engelm. y var. *australis*. Ensayos en campo con materiales de algunas poblaciones indican ciertas diferencias entre las variedades de este pino (Alba *et al.*, 1998; Azamar *et al.*, 2000). Ramírez *et al.*, (1997) encontraron que existen altas diferencias entre poblaciones y una baja variabilidad dentro de poblaciones.

El objetivo del trabajo fue determinar la vulnerabilidad del xilema a la cavitación de *Pinus greggii* var. *greggii* y examinar la variación de dos familias en cuanto a la vulnerabilidad del xilema, conductividad y eficiencia hidráulica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área experimental

El ensayo de progenie de *P. greggii* se encuentra establecido en el Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) de la UAAAN, Arteaga, Coah., ubicado a 45 km de Saltillo, Coah., mismo que se ubica entre las coordenadas geográficas 25° 23' a 25° 24' de

latitud norte y 100° 36' a 100° 37' de longitud oeste, a una altitud de 2280 msnm. De acuerdo con la estación meteorológica de San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Coah., ubicada a 12 km del CAESA, el clima del área es templado con verano fresco y largo, con una temperatura media anual de 13.6° C; la precipitación media anual es de 521.2 mm; la fórmula climática del área de estudio es Cb(X')(Wo)(e)g (García, 1987).

Colecta de ramas de los árboles

Las ramas se colectaron durante el mes de marzo de 2008. Se consideraron muestras de la familia 19, por ser una de las mejores familias dentro del ensayo y la familia 21 como una de las familias inferiores dentro del ensayo, de acuerdo con Vela (2002).

De cada familia se seleccionaron siete árboles al azar recolectando una muestra de ramas no bifurcada, de la parte de media de la copa y que estuviese expuesta al sol la mayor parte del tiempo, de 0.5 a 1 m de longitud, y con un diámetro de 3 a 5 mm de cada uno de los árboles. Cada rama se guardó en una bolsa de plástico y se transportó al Laboratorio de Ciencias Básicas de la UAAAN, donde segmentos de aproximadamente 15 cm de largo se cortaron y se almacenaron en refrigeración a una temperatura de 4 ° C por una semana, para evitar la pérdida de agua de las muestras.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica fue medida de acuerdo al método de Sperry *et al.* (1988). En el laboratorio los tallos o ramas colectadas en campo, se utilizaron sin corteza con un diámetro de 2 a 4 mm, se saturaron en agua destilada por 1 h para permitir el levantamiento de la corteza y el cambium, después un segmento de las ramas de 15 a 25 cm de longitud fue cortado y se hicieron tres cortes superficiales en la parte central de cada segmento, para facilitar la entrada de aire a la traqueidas. Los segmentos cortados fueron puestos en agua a 4°C durante 2 horas, para reducir la emisión de resina. Ambos extremos de cada tallo fueron cortados aproximadamente a 1 cm de los extremos, con una hoja afilada antes de conectar el extremo próximo al sistema de tubería (Figura 7a).

Se filtró agua a 0.22 μm acidificada a un pH de 2 con HCl (ácido clorhídrico) a una concentración de 3%, la cual se usó inicialmente para limpiar el posible embolismo pre-existente, filtrándola a través de los tallos por 1 h a 0.7 MPa e impulsada por el acumulador de presión (Figura 7b). El agua acidificada fue para inhibir el crecimiento de microbios sobre las paredes interiores de la tubería, el cual pudiera ser la causa de la obstrucción del xilema (Sperry *et al.*, 1988).

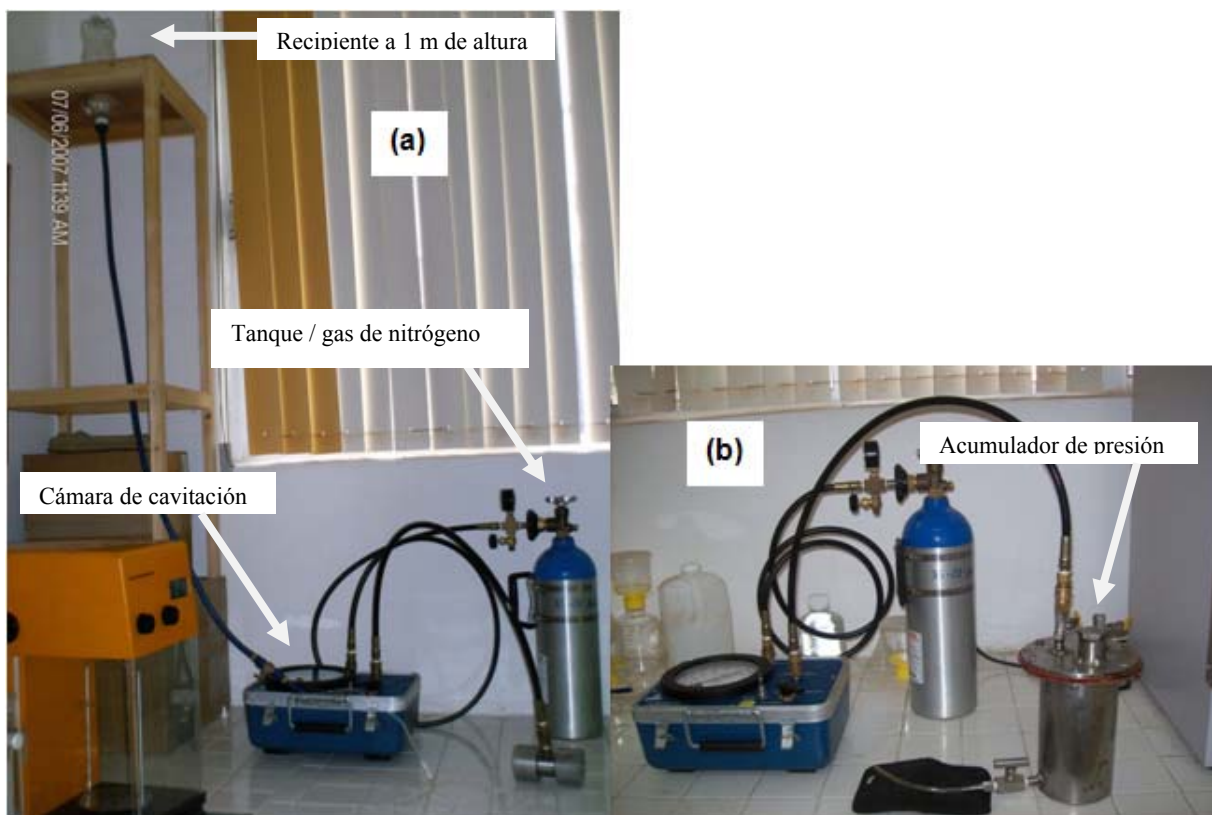


Figura7. (a) Sistema utilizado para evaluar la vulnerabilidad del xilema a la cavitación en tallos de *Pinus greggii* Engelm., (b) Sistema utilizado para la estandarización de tallos (limpieza de embolismo pre-existente).

Se utilizó una cámara de presión PMS modelo 1000 (Corvallis, Oregon, USA), donde la solución acidificada se aplicó a través de los segmentos del tallo a una presión alcanzada de 9.8 kPa (a un altura de 1 m) por 15 minutos. El agua que fluía a través del extremo del segmento fue colectada en frascos pre-pesados llenados de algodón de acuerdo a Sperry *et al.* (1988). La conductividad hidráulica (kh , en $\text{kg m}^{-1} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) se calculó de la tasa de flujo volumétrico a través del segmento ($F = \Delta V / \Delta t$), la longitud del segmento (Δl), y la diferencia de presión que se aplicó (ΔP), de acuerdo a: $F = \Delta V / \Delta t = kh (\Delta P / \Delta l)$.

Vulnerabilidad a la cavitación de xilema

Las curvas de vulnerabilidad fueron obtenidas siguiendo el método de inyección de aire de Cochard *et al.* (1992) y Sperry y Saliendra (1994). Se determinó la conductividad hidráulica máxima antes de la inducción de la cavitación. Las curvas de vulnerabilidad se obtuvieron inyectando aire con la cámara presión PMS a una presión de 1 MPa durante 10 minutos para inducir el embolismo en los tallos. Durante la inyección de aire se creó una salida de aire en el extremo próximo de cada tallo para evitar llenar el sistema de la tubería de aire. La presión se liberó 10 min después, manteniendo una presión residual de 10 kPa dentro de la cámara para evitar cualquier posible cambio en el embolismo del xilema. El aire atrapado en el sistema de la tubería fue eliminado para restablecer el flujo de agua a través de los tallos. Quince minutos después de restablecer el flujo, la conductividad hidráulica era de nuevo medida. El porcentaje de la pérdida de conductividad (PPC) fue calculado seguido de cada presurización de la cámara con la ecuación 1.

$$PCL = \frac{100(K_{max} - Kh)}{K_{max}}$$

Ecuación 1

Donde Kh es la conductividad hidráulica del segmento medido después de cada presurización de la cámara. Este procedimiento se repitió a 2, 3, 4, 5, 6 y 7 MPa.

Parámetro de eficiencia hidráulica

La conductividad hidráulica específica (ks , en $\text{kg m}^{-2} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$), es una medición directa de la eficiencia, definida como la conductividad hidráulica (kh) dividida por el área funcional del segmento o área de conducción. La ks fue calculada por la división de la máxima

kh de cada rama por el área seccional de toda la rama. El área seccional fue calculada midiendo el diámetro medio de la rama.

Análisis estadístico

La presión media de la cavitación que causa un 50% de pérdida de conductividad hidráulica, fue estimada ajustando las curvas de vulnerabilidad a la función (Pammenter y Vander, 1998) (Ecuación 2).

$$PCL = \frac{100}{1 + \exp[a(P - b)]} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde PCL es el porcentaje de la pérdida de la conductividad, P es el potencial hídrico, a y b son la pendiente de la curva y el potencial hídrico al 50% de la pérdida de conductividad (PPC50), respectivamente. Los coeficientes a y b se determinaron de una forma de lineal de la ecuación 3.

$$\ln(100/PPC - 1) = a\Psi - ab \quad \text{Ecuación 3}$$

Una gráfica de $\ln(100/PLC - 1)$ contra ψ , produjo una línea recta de pendiente a con un intercepto de la ordenada $-ab$ (Pammenter y Vander, 1998), dicha recta fue ajustada con el software SigmaPlot versión 10.0. La curva de vulnerabilidad de cada rama se trató como una repetición que produjo un solo valor de a y b . Los valores de las repeticiones de a y b de las siete ramas de cada familia fueron comparados entre familias por un análisis de comparación de medias. Para llevar a cabo la comparación estadística de las familias con respecto al potencial hídrico al 50% de la pérdida de conductividad y la eficiencia hidráulica, se realizó

una comparación de medias con el Statistical Analysis System (SAS) versión 9.1, utilizando el procedimiento PROC TTEST.

De acuerdo a la función de Pammenter y Vander (1998) el valor de 100 es usado para representar la pérdida máxima en conductividad. El coeficiente b determina la posición de la curva sobre la abscisa y da el potencial hídrico correspondiente a 50% de pérdida de conductividad. Según el mecanismo de cavitación por inyección aire, la mayor vulnerabilidad pudiera estar asociada con un máximo de poros con membranas de punteaduras grandes, y el coeficiente b (β_1) podría relacionarse a la media del poro con punteaduras mas grandes por vaso. El coeficiente a (β_0) esta relacionado principalmente a la inclinación de la curva, y por lo tanto al rango de potenciales hídricos sobre el cuál la conductividad se pierde. Una ligera inclinación sugiere la cavitación de los conductos del xilema es por una amplia gama de tensiones, y entonces a podría estar relacionada a la distribución de los poros de máximo tamaño por vaso.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas de vulnerabilidad hidráulica fueron construidas para las dos familias (19 y 21) de *Pinus greggii* var. *greggii* (Figura 8 y 9), también se construyó una curva para representar la especie de *P. greggii* var. *greggii*, utilizando los datos de ambas familias (Figura 10).

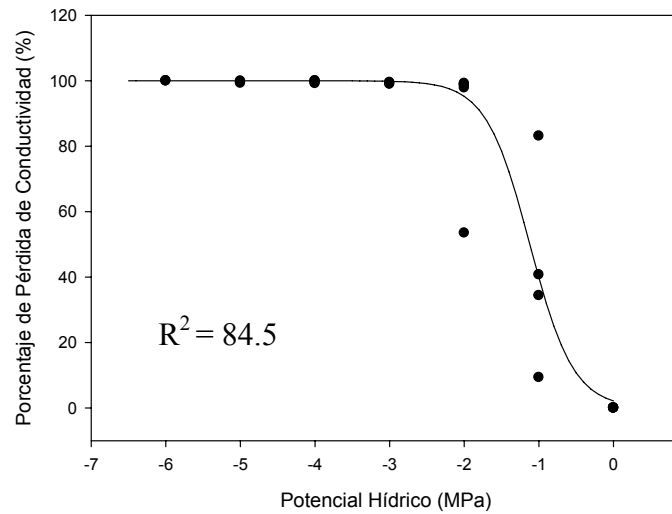


Figura 8. Vulnerabilidad del xilema a la cavitación ilustrada como el porcentaje de la pérdida de conductividad con la disminución del potencial hídrico de la familia 21 del ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

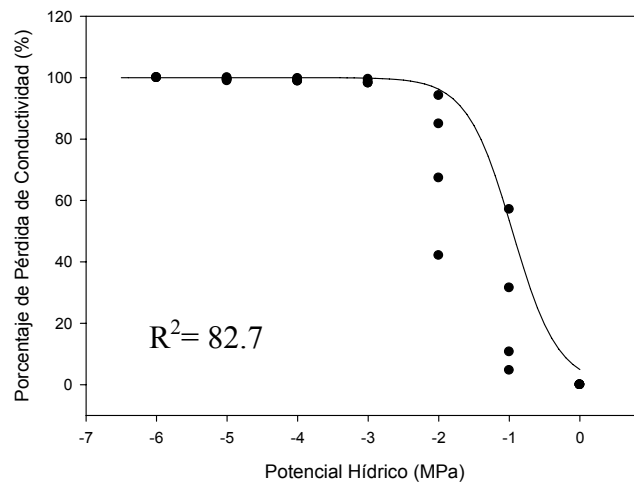


Figura 9. Vulnerabilidad del xilema a la cavitación ilustrada como el porcentaje de la pérdida de conductividad con la disminución del potencial hídrico de la familia 19 del ensayo de progenie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

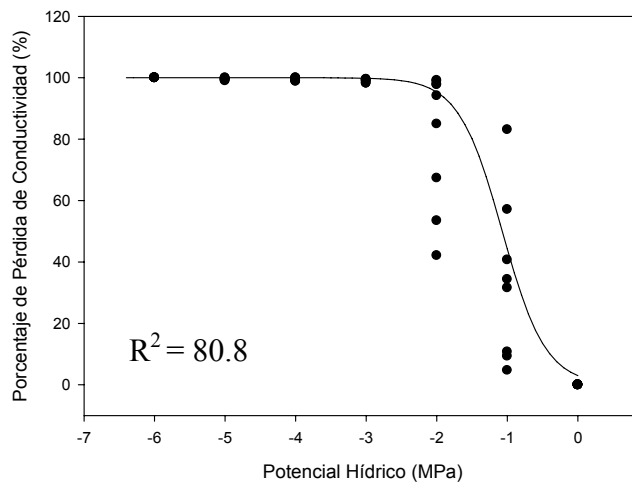


Figura 10. Vulnerabilidad del xilema a la cavitación ilustrada como el porcentaje de la pérdida de conductividad con la disminución del potencial hídrico de la especie de *Pinus greggii* de muestras del ensayo de progenie de la especie establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Los coeficientes determinados cuando la ecuación 2 se ajustó a estas curvas, la eficiencia hidráulica y la conductividad máxima se resumen en los Cuadros 3 y 4. En el análisis de comparación de medias, no se encontraron diferencias significativas de los valores de *a* and *b* entre las familias 19 y 21. La alta variabilidad entre las observaciones de un mismo potencial hídrico quizás se debe a que nada más se tomo una observación por árbol.

Tampoco se encontraron diferencias significativas en la eficiencia hidráulica y la conductividad máxima. Lo que significa que ambas familias presentan la misma capacidad de transporte de agua. Ya que bajo condiciones de estrés, cuanto mayor sea el incremento en la resistencia hidráulica, mayor será la eficiencia en el control del gasto hídrico en el tramo de transporte a través del tallo. Por lo tanto, ambas familias presentan el mismo control del gasto hídrico. También se puede concluir que la pérdida de conductividad se presenta sobre el

mismo rango de potenciales hídricos para ambas familias y que los árboles de ambas familias presentan el mismo rango de poros con membranas de punteaduras de tamaño máximo.

Cuadro 3. Comparación de los valores medios de los coeficientes a y b con la prueba de t , utilizados para ajustar la ecuación sigmoideal exponencial usada para describir la curvas de vulnerabilidad de las familias 19, 21 y para la especie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila. los valores de R^2 son de la regresión lineal de los datos transformados (Ecuación 3).

Familia	a	b	R^2 (%)
19	1.2303 a	-1.40903 a	82.7
21	1.22688 a	-2.53445 a	84.5
Especie	1.17788	-2.05212857	80.8

Cuadro 4. Comparación de los valores medios de la kh máxima y la eficiencia hidráulica de las familias 19, 21 con la prueba de t , para la especie de *Pinus greggii* Engelm., establecido en el CAESA, Arteaga, Coahuila.

Familia	kh máxima (Kg m ⁻¹ MPa s ⁻¹)	Eficiencia hidráulica (ks) (Kg m ⁻² MPa s ⁻¹)
19	9.0E-06 a	1.750 a
21	9.1E-06 a	1.728 a
Especie	9.0E-06	1.739

Las vulnerabilidades de las familias estudiadas fueron más bajas que aquéllas que obtuvieron para dos procedencias de *Eucalypto camaldulensis* donde PPC50 fueron de -3.8 a -4.2 MPa (Franks *et. al.*, 1995). Sin embargo, la familia 19 presentó una vulnerabilidad más

alta y la familia 21 más baja que en un estudio de cuatro clones de *Eucalipto* donde PPC50 fueron de -1.762, -1.331, -1.578 y -3.8 MPa (Pammenter y Vander, 1998).

De acuerdo a los resultados encontrados en PPC50% por Froux *et al.* (2002) en *Pinus nigra* Arn. ssp. *Nigricans* (-2.8 MPa), *Cedrus atlantica* Manetti (-3.8 MPa), *Cupressus sempervirens* L. (-4.8 MPa) y *Pinus halepensis* Mill. (-4.9 MPa), se puede inferir que *Pinus greggii* es más vulnerable que estas especies. Así como también, *Pinus ponderosa* Laws, es ligeramente más resistentes a la cavitación que *Pinus greggii* (Hafiz y Evan, 2000). En un estudio realizado de Pockman y Sperry (2000) encontraron que en *Juniperus monosperma* (Engelm.) Sarg., el PPC50% es a -13 MPa, lo cual significa que es mucho más resistente a la cavitación que *Pinus greggii*, esto debido a que *Juniperus monosperma* fue evaluado en un hábitat desértico.

En una revisión realizada por Martínez *et al.* (2004) reportaron que *Pinus albicaulis* alcanzaba el PPC50% a -3.63 MPa, *Pinus contorta* a -3.03, *Pinus edulis* a -4.50 en EUA, *Pinus halepensis* a -3.11, *Pinus nigra* a -3.20, *Pinus pinaster* a -3.01, *Pinus pinea* a -3.65 en España, *Pinus ponderosa* de -2.94 a -3.43 en EUA, *Pinus sylvestris* de -3.20 a -3.57 en España, *Pinus sylvestris* a -3.10 en Francia, *Pinus taeda* a -3.80 a -3.23 MPa en EUA.

Los resultados obtenidos, comparados con resultados reportados de otras especies; demuestran que *Pinus greggii* parece ser una especie más vulnerable a la cavitación, lo cual induciría a pensar que no puede ser funcional en condiciones de sequía, ya que la cavitación impediría la conducción de agua. Sin embargo, la experiencia en otros trabajos demuestra que

es una especie con un gran potencial para adaptarse a condiciones limitantes de humedad (López, 1990), también en la República de Sudáfrica y en Argentina se han establecido plantaciones con *Pinus greggii* en localidades con niveles bajos de precipitación donde especies con alta tasas similares de crecimiento y productividad como *Pinus patula* Sch. et Cham y *P. taeda* L. no pueden prosperar (Dvorak y Donahue, 1993).

La pérdida de conductividad hidráulica xilemática supone un incremento en la resistencia hidráulica al transporte a través del tallo. Por lo tanto, la especie al ser más vulnerable, en condiciones de mayor estrés hídrico presenta una mayor resistencia hidráulica ante las pérdidas de agua en relación con las especies con las que se comparó, las cuales son menos vulnerables y significa que no presentan ningún tipo de respuesta en el transporte de agua a través del tallo en dichas condiciones.

CONCLUSIONES

La comparación entre la familias 19 y 21 en cuanto a la vulnerabilidad a la cavitación, conductividad máxima y eficiencia hidráulica, no arrojó diferencias significativas, por lo tanto ambas familias presentan la misma capacidad de transporte de agua, el mismo control del gasto hídrico y el evento de cavitación en la columna de agua de xilema se inician a potenciales hídricos similares en ambas familias. *Pinus greggii* var. *greggii* presentó una vulnerabilidad a la cavitación ligeramente mayor que otras pináceas reportadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alba L J, L Mendizábal H, A Aparicio R (1998)** Respuesta de un ensayo de procedencia/progenie de *Pinus greggii* Engelm. en Coatepec, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 1(1):25-28.
- Azamar O M, J López U, J J Vargas H, A Plancarte B (2000)** Evaluación de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. *In: Ponencias I Congreso Nacional de Reforestación*. Montecillo, Texcoco, México. pp:1-9.
- Castellanos B J F, M Ruiz M (1993)** Introducción de *Pinus greggii* Engelm. en la Mixteca Alta Oaxaqueña. Folleto de investigación No. 1. INIF, SARH. Centro de Investigación Pacífico Sur. Yanhuitlán, Oaxaca, Méx. 18 p.
- Cochard H (1992)** Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiology* 11, 73–83.
- Cochard H, P Cruiziat, M T Tyree (1992)** Use of positive pressures to establish vulnerability curves. *Plant Physiology* 100: 205–209.
- Donahue J K, J López U (1999)** A new variety of *Pinus greggii* (*Pinaceae*) in Mexico. *SIDA* 18: 1083-1093.
- Dvorak W S, J K Donahue (1993)** Reseña de investigaciones de la cooperativa CAMCORE 1980-1992. CAMCORE. Raleigh, N.C. U.S.A. 94 p.
- Franks P J, A. Gibson y E P Bachelard (1995)** Xylem permeability and embolism susceptibility in seedlings of *Eucalyptus camuldulensis* Dehnh. from two different climatic zones. *Aust. J. Plant Physiol* 22: 15--21.

- Froux F, Huca R, Ducreya M, Dreyerb E (2002)** Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). *Ann. For. Sci.* 59: 409–418.
- García E (1987)** Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 245 p.
- Hafiz M, D Evan H (2000)** Xylem conductivity and vulnerability to cavitation of ponderosa pine growing in contrasting climates. *Tree Physiology* 20: 859–867.
- Hafiz M, W T Pockman, R B Jackson (2004)** Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. *Ecology* 85(8): 2004, 2184–2199.
- Herralde T F (2000)** Estudio integral de las respuestas ecofisiológicas al estrés hídrico: Caracterización de variedades de almendro. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. Divisió de Ciències Experimentals i Matemàtiques. Departament de Biologia Vegetal. Facultat de Biologia. España. 144 p.
- Jarbeau J A, F W Ewers, S D Davis (1995)** The mechanism of water-stress-induced embolism in two species of chaparral shrubs. *Plant, Cell and Environment* 18: 189–196.
- López U J (1990)** Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 91 p.
- López U J, J Jasso M, J J Vargas H, C Ayala S (1993)** Variación de características morfológicas en conos y semillas de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 3(1): 81-84.

- López A J L, J J Vargas H, C Ramírez H, J López U (1999)** Variación intraespecífica en el patrón de crecimiento en altura del brote terminal en *Pinus greggii* Engelm. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales 5(2): 133-140.
- Martínez V J, Salas A, Piñol J (2004)** The hydraulic architecture of Pinaceae – a review Plant Ecology 171: 3–13.
- Neufeld H S, D A Grantz, F C Meinzer, G Goldstein, G M Crisosto y C Crisosto (1992)** Genotypic variability in vulnerability of leaf xylem to cavitation in water-stressed and well-irrigated sugarcane. Plant Physiol 100:1020-1028.
- Pammenter N W, C Vander W (1998)** A mathematical and statistical analysis of the curves illustrating vulnerability of xylem to cavitation. Tree Physiology 18: 589–593.
- Pockman W, J S Sperry (2000)** Vulnerability to xylem cavitation and the distribution of sonoran desert vegetation1. American Journal of Botany 87(9): 1287–1299.
- Ramírez H C, J J Vargas H, J Jasso M, G Carrillo C, H Guillén A (1997)** Variación isoenzimática de diez poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. Agrobiencia 31:223-230.
- Salazar G J G, J J Vargas H., J Jasso M, J D Molina G, C Ramírez H, J López U (1999)** Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. Madera y Bosques 5(2): 19-34.
- Sperry J S, N Z Saliendra (1994)** Intra- and inter-plant variation in xylem cavitation in *Betula occidentalis*. Plant, Cell and Environment 17: 1233–1241.
- Sperry J S, T Ikeda (1997)** Xylem cavitation in roots and stems of Douglas-fir and white-fir. Tree Physiology 17: 275–280.
- Sperry J S, W T Pockman (1993)** Limitation of transpiration by hydraulic conductance and xylem cavitation in *Betula occidentalis*. Plant, Cell and Environment 16: 279–287.

- Sperry J S, M T Tyree (1990)** Water-stress-induced xylem embolism in three species of conifers. *Plant, Cell and Environment* 13: 427–436.
- Sperry J S, J R Donnelly y M T Tyree (1988)** A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. *Plant Cell Environment* 11: 35-40.
- Tyree M T y F W Ewers (1991)** The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytologist* 119: 345-360.
- Tyree M T, F W Ewers (1996)** Hydraulic architecture of woody plants. *In Tropical Forest Plant Ecophysiology*. Eds. S.S. Mulkey, R.L. Chazdon and A.P. Smith. Chapman and Hall, New York, USA, pp. 217—243.
- Tyree M T, J S Sperry (1989)** Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40:19–38.
- Vargas H J J, B Bermejo V, F Thomas L (2004)** Manejo de Recursos Genéticos Forestales, Segunda Edición. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México, y Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. 209 p.
- Vela M R (2002)** Supervivencia, crecimiento y arquitectura de copa en una prueba de progenie de *Pinus greggii* Engelm. en el C.A.E.S.A., Arteaga, Coahuila. Tesis Profesional. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 67 p.
- Zimmermann M H (1983)** Xylem structure and the ascent of sap. *In: Zimmermann H M, Brown L C, Tyree M. Trees structure and function*. Springer-Verlag, New York, USA, pp. 169 - 216.

DISCUSIÓN GENERAL

Las variables que integraron a los índices de selección, fueron consistentes en ambos índices y aunado a esto que son variables que han sido utilizadas para la construcción de otros índices (Ladrach *et al.*, 1977; Bridgwater *et al.*, 1983; Park *et al.*, 1989; Torres, 2000; Valencia y Vargas, 2001; Farfán *et al.*, 2002). Por lo tanto, queda en manifiesto que en la construcción de índice de selección a través del método multivariados basado en componentes principales (CP), es el primer CP que mejor determina la proporción y vector característico de los valores fenotípicos de los caracteres y determinan la proporción con que los caracteres respectivos contribuyen al nuevo índice, lo cual reafirma lo encontrado por Cerón y Sahagún (2005).

Además, la cantidad de trabajos reportados sobre la conversión de ensayos de progenie y procedencias a huertos semilleros es muy pequeña, tales como, Azamar *et al.*, (2000) al convertir un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* Engelm. a huerto semillero en el Estado de México y Harrand (2002) al transformar un ensayo de progenie a huerto semillero de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden establecido en Argentina. Debido a lo anterior es importante desarrollar metodologías simples y aplicables para este de tipo de trabajo, tal como lo es la construcción de índices de selección a través del método multivariados basado en componentes principales.

Los huertos semilleros se diseñaron con las densidades propicias para permitir la operación mecánica por tractores y otras máquinas, para el manejo futuro del huerto de

acuerdo con Clausen (1990) y Schmidt (1993). Los huertos se diseñaron con una densidad de 156 árboles ha⁻¹, en el CAESA y con una densidad de 97 árboles ha⁻¹ en Tarihuanes, lo que significa que presentan densidades mas bajas que las utilizadas en el establecimiento de otros huertos semilleros (Ladrach *et al.*, 1977; Zobel y Talbert, 1988; Schmidt, 1993; Azamar *et al.*, 2000; Harrand, 2002), lo que permitirá un mejor manejo de los huertos semilleros diseñados.

La razón por la que no se encontraron diferencias significativas en la eficiencia hidráulica y la conductividad máxima de las dos familias, quizás se deba a la baja variabilidad que existe dentro de las poblaciones de *Pinus greggii* (Ramírez *et al.*, 1997). Lo que significa que ambas familias presentan la misma capacidad de transporte de agua; ya que bajo condiciones de estrés, cuanto mayor sea el incremento en la resistencia mayor será la eficiencia en el control del gasto hídrico en el tramo de transporte a través del tallo. Por lo tanto, ambas familias presentan el mismo control del gasto hídrico. Al no encontrar diferencias significativas entre familias, implica que el evento de cavitación en la columna de agua de xilema se inicia a potenciales hídricos similares en ambas familias.

Pinus greggii var. *greggii* parece ser una especie mas vulnerable al fenómeno de cavitación en comparación de todas las especies del género *Pinus* hasta el momento estudiadas (Hafiz y Evan, 2000; Pockman y Sperry, 2000; Froux *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2004). Lo cual induce a pensar que no puede ser funcional en condiciones de sequía, ya que la cavitación impediría la conducción de agua. Sin embargo, la experiencia en otros trabajos nos demuestra que una especie como un gran potencial para adaptarse a condiciones limitantes de humedad (López, 1990; Dvorak y Donahue, 1993). Lo cual indica que *Pinus greggii* en condiciones de

mayor estrés hídrico presentan una mayor resistencia hidráulica ante las pérdidas de agua, presentando respuesta en el transporte de agua a través del tallo en dichas condiciones.

CONCLUSIONES GENERALES

Las variables usadas para la construcción de los índices fueron diámetro normal, volumen y altura. La aplicación de aclareos por lo bajo y un aclareo geométrico en ambos ensayos, mediante dos simulaciones con el SVS, permitieron el diseño de los dos huertos semilleros que incluye los mejores árboles semilleros para obtener semilla mejorada para el sitio donde se encuentra establecidos los ensayos y producir planta para reforestar sitios con condiciones ambientales y topográficas similares. El uso del SVS facilitó el diseño de las áreas visualizando la distribución espacial para cada árbol. La densidad de árboles que formaran los huertos semilleros está dentro del rango de las densidades utilizadas en otros estudios. La decisión de mantener un alto número de familias, a fin de poseer una alta variabilidad genética, conlleva a mantener dentro de los huertos individuos con baja calificación, disminuyendo la ganancia genética final.

No se encontraron diferencias significativas en la eficiencia hidráulica y la conductividad máxima entre las familias 19 y 21. *Pinus greggii* Engelm.var. *greggii* presentó una vulnerabilidad a la cavitación ligeramente mayor que otras pináceas reportadas.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Azamar O M, J López U, J J Vargas H, A Plancarte B (2000)** Evaluación de un ensayo de procedencias-progenie de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. *In:* Memorias del primer Congreso Nacional de Reforestación. SEMARNAP – Colegio de Postgraduados Montecillo, Edo. de México. 9 p.
- Bridgwater F E, J T Talbert, S Jahromi (1983)** Index selection for increased dry weight in a young loblolly pine population. *Silvae Genetica*. 32: 5-6.
- Cerón R J J, J Sahagún C (2005)** Un índice de selección basado en componentes principales. *Agrociencia*. 39. 667 – 677.
- Clausen K E (1990)** Producción de semillas forestales genéticamente mejoradas. *In:* Memoria Sobre Mejoramiento Genético y Plantaciones Forestales. Eguiluz P T, A Plancarte B (Editores). Chapingo, México. pp. 78-88.
- Dvorak W S, J K Donahue (1993)** Reseña de investigaciones de la cooperativa CAMCORE 1980-1992. CAMCORE. Raleigh, N.C. U.S.A. 94 p.
- Farfán V E G, J Jasso M, J López U, J J Vargas H, C Ramírez H (2002)** Parámetros genéticos y eficiencia de las selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(3):239 – 246.
- Franks P J, A. Gibson y E P Bachelard (1995)** Xylem permeability and embolism susceptibility in seedlings of *Eucalyptus camuldulensis* Dehnh. from two different climatic zones. *Aust. J. Plant Physiol*. 22:15--21.
- Froux F, Huca R, Ducreya M, Dreyerb E (2002)** Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus*

- atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). Ann. For. Sci. 59 (2002) 409–418.
- Hafiz M, D Evan H (2000)** Xylem conductivity and vulnerability to cavitation of ponderosa pine growing in contrasting climates. Tree Physiology 20: 859–867.
- Hafiz M, W T Pockman, R B Jackson (2004)** Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. Ecology, 85(8), 2004, 2184–2199.
- Harrand L (2002)** Utilización de “Valores de Cría” Para la habilitación de un huerto semillero de progenies. Proyecto de Desarrollo Forestal – PPMPM Eucaliptos en Mesopotamia. EEA INTA Concordia. Argentina. 5 p.
- Ladrach W, M Gutiérrez, P Arboleda, M H García (1977)** Establecimiento de un huerto semillero de *Cupressus lusitanica* Mill. Informe de Investigación No. 25. Smurfit Cartón Colombia S.A. Investigación Forestal. Cali, Colombia. 16 p.
- López U J (1990)** Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 91 p.
- López U J, J Jasso M, J J Vargas H, C Ayala S (1993)** Variación de características morfológicas en conos y semillas de *Pinus greggii*. Agrociencia 3(1): 81-84.
- Martinez V J, Salas A, Piñol J (2004)** The hydraulic architecture of Pinaceae – a review. Plant Ecology 171: 3–13.
- Park Y S, J D Simpson, D P Fowler, E K Morgenstern (1989)** A selection index with desired gains to rogue jack pine seedling seed orchards. Information report M-X-176. Forestry Canada – Maritimes Region. New Brunswick. 18 p.
- Pammenter N W, C Vander W (1998)** A mathematical and statistical analysis of the curves illustrating vulnerability of xylem to cavitation. Tree Physiology 18, 589–593.

- Pockman W, J S Sperry (2000)** Vulnerability to xylem cavitation and the distribution of sonoran desert vegetation1. *American Journal of Botany*. 87(9): 1287–1299.
- Ramírez H C, J J Vargas H, J Jasso M, G Carrillo C, H Guillén A (1997)** Variación isoenzimática de diez poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. *Agrociencia* 31:223-230.
- Schmidt L (1993)** Seed Orchards. Guidelines on establishment and management practices. Undp/FAO regional project on improved productivity of man-made forests through application of technological advances in tree breeding and propagation (ras/91/004). Philippines. 103p.
- Sperry J S, W T Pockman (1993)** Limitation of transpiration by hydraulic conductance and xylem cavitation in *Betula occidentalis*. *Plant, Cell and Environment* 16:279–287.
- Torres J (2000)** Evaluación genética y económica de dos ensayos de progenie de *Pinus radiata* D. Don a base de un índice de selección multicriterio.. Nota Técnica Ciencias Forestales. Departamento de Silvicultura, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 14(1-2):1-7.
- Valencia M S, J J Vargas H (2001)** Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula*. *Agrociencia*. 35: 109-120.
- Vargas H J J, B Bermejo V, F Thomas L (2004)** Manejo de Recursos Genéticos Forestales, Segunda Edición. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México, y Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. 209 p.
- Zobel B J, J T Talbert (1988)** Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Limusa. México. 545 p.

APÉNDICE

Programa para el análisis de componentes principales

```
options ls=80 ps=60 pageno=1;
data benito;
infile      'C:\BENITO\TESIS      CONVERSION      DE      HUERTOS
SEMILLEROS\CAESA\SEGUNDO PROCESO\sinconos.dat';
input id $ db dn at dc dr ar nr vp cra crd coc f nv dm;
proc princomp data=benito out=scores;
var db dn vp at dc dr;
run;
proc sort;
  by prin1;
proc print;
  id id;
  var prin1 prin2 db dn vp at dc dr;
run;
proc plot data=scores;
  plot prin1*prin2=id / vref=0 href=0 hpos=60 vpos=40;
  plot prin2*prin1=id / vref=0 href=0 hpos=60 vpos=40;
run;
proc sort;
  by prin2;
proc print;
  id id;
  var prin1 prin2 db dn vp at dc dr;
run;
proc sort;
  by prin3;

proc print;
  id id;
  var prin2 prin3 db dn vp at dc dr;
run;
```

Programa para el análisis de CLUSTER

```
options ls=80 ps=60 pageno=1;
data benito;
infile'C:\BENITO\TESIS          CONVERSION          DE          HUERTOS
SEMILLEROS\CAESA\SEGUNDO PROCESO\sinconos.dat';
input id $ db dn at dc dr ar nr vp cra crd coc f nv dm;
proc cluster out=tree method=ward pseudo ccc pseudo;
  id id;
var db dn vp at dc dr;
run;
proc plot;
  plot _ccc_*_ncl=_ncl_ / haxis=0 to 16 by 2;
run;
proc tree data=tree out=treeout nclusters=2;
  id id;
  copy db dn vp at dc dr;
run;
proc sort data=treeout;
  by cluster;
proc print data=treeout;
  var id cluster;
run;
```

PROTOCOLO PARA EL ESTUDIO DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN

COLECTA DE MUESTRAS

1. Colecta de muestra de ramas no bifurcadas totalmente expuestas al sol con longitud de por lo menos 30 cm, y con un diámetro de 3-5 mm de cada uno de los diferentes árboles.
2. Cada rama se guarda en una bolsa de plástico y se transportará al laboratorio, donde se corta un segmento de aproximadamente 15 cm de largo, se marca, y se guarda en un refrigerador a una temperatura de 4 ° C por una semana.

MÁXIMA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

3. Los tallos a utilizar sin corteza deben ser de 2 - 4 mm, con una media de 3 mm., se saturan en agua destilada por 1 h para permitir el levantamiento de la corteza y el cambium.
4. Se realizan tres cortes superficiales en la parte central de cada segmento, para facilitar la entrada de aire al xilema.
5. Ambos extremos de cada tallo se cortan de aproximadamente 1 cm de los extremos, con una hoja afilada antes de conectar el extremo próximo al sistema de tubería.
6. Se filtra agua a 0.22 μm acidificada a un pH de 2 con HCl (ácido clorhídrico) a una concentración de 3%.
7. El agua filtrada se usa para limpiar el posible embolismo pre-existente, filtrándola a través de los tallos por 1 h a 0.7 MPa.

8. Para determinar la Máxima conductividad hidráulica se utiliza una cámara de presión PMS modelo 1000 (Corvallis, Oregon, USA), donde la solución acidificada se aplica a través de los segmentos del tallo a una presión alcanzada de 9.8 MPa (a un altura de 1 m) por 15 minutos.
9. El agua que fluye a través del extremo del segmento se reúne en frascos pre-pesados llenados de algodón.
10. La conductividad hidráulica (kh , en $\text{kg}^{-1} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) se calcula de la tasa de flujo volumétrico a través del segmento ($F = \Delta V/\Delta t$), la longitud del segmento (Δl), y la diferencia de presión que se aplica (ΔP), de acuerdo a:

$$F = \Delta V/\Delta t = kh (\Delta P/\Delta l)$$

CURVAS DE VULNERABILIDAD

11. Después de determinar la máxima conductividad hidráulica, las curvas de vulnerabilidad se obtienen inyectando aire con la cámara de una presión de 1 MPa durante 10 min para inducir el embolismo en los tallos.
12. Durante la inyección de aire se crea una salida de aire en el extremo próximo de cada tallo para evitar llenar el sistema de la tubería de aire.
13. La presión se liberará 10 min después, se mantiene una presión residual de 10 kPa dentro de la cámara para evitar cualquier posible cambio en el embolismo del xilema.
14. El aire atrapado en el sistema de la tubería se elimina para restablecer el flujo de agua a través de los tallos.

15. Quince minutos después de restablecer el flujo, la conductividad hidráulica será de nuevo medida, y la pérdida del porcentaje de conductividad (PLC) relativo al máximo se calculará.

16. Este procedimiento se repetirá 2, 3, 4, 5, 6, 7 y n.... MPa.