

**VULNERABILIDAD A LA CAVITACIÓN XILEMÁTICA DE TRES
POBLACIONES NATURALES DE *Pinus greggi* var. *greggii* ENGELM Y SU
RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS**

FERNANDO GALINDO GARCÍA

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

“VULNERABILIDAD A LA CAVITACIÓN XILEMÁTICA DE TRES
POBLACIONES NATURALES DE *Pinus greggii* var. *greggii* ENGELM Y SU
RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS”

TESIS

FERNANDO GALINDO GARCÍA

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y Aprobada
como requisito parcial para optar al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

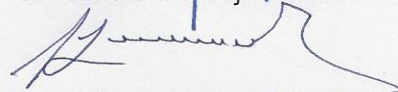
COMITÉ PARTICULAR

Asesor Principal:



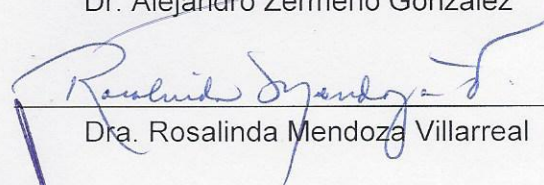
Dr. Eladio Cornejo Oviedo

Asesor:



Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor:



Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Subdirector de Postgrado

Saltillo, Coahuila, México, Junio, 2015

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, que siempre serán un ejemplo de vida. Jamás pagaré lo mucho que me han dado, intentaré resarcirlo en mis hijos.

A mis hermanos, que nunca terminemos juntos nuestro aprendizaje, que nunca dejarán de sorprenderme, animarme y hacerme sentir fuerte.

A mi esposa, que ha hecho de mí un mejor hombre y a Dios que me puso en su camino.

A mis hijos, por existir.

A mí país México, que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología me dio la oportunidad de llegar hasta una Maestría.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, que mediante sus Departamentos Forestal y de Riego y Drenaje, compartieron gustosamente sus conocimientos conmigo.

Al Dr. Eladio Cornejo, gracias por su apoyo y constancia. Gracias por brindarme tiempo y dedicación.

Al Dr. Alejandro Zermeño, gracias por esas sesiones que sin duda me acercaron más a la ciencia.

A todos aquellos que han mejorado mi vida, ya sea por ayudarme o por dejarme solo, me presento como la suma de todo lo que otros han invertido en mí... muchas gracias.

Dedicatoria

Al Ing. Víctor Araujo Rubio...

COMPENDIO

VULNERABILIDAD A LA CAVITACIÓN XILEMÁTICA DE TRES POBLACIONES NATURALES DE *Pinus greggii* var. *greggii* ENGELM Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS

POR:

FERNANDO GALINDO GARCÍA

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COHAUILA. JUNIO DE 2015.

Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo -Asesor-

Palabras clave: *Pinus greggii*, cavitación xilemática, estrés hídrico, climatología, topología.

En este estudio se desarrolló un análisis de variables fisiológicas indicadoras del estrés hídrico y su relación con variables ambientales para la especie *Pinus greggii* var. *greggii* Engelm., que fue seleccionada por ser una pinácea endémica de México, con alto potencial productivo y que es considerada como una especie resistente a condiciones ambientales adversos. La cavitación xilemática fue determinada para tres poblaciones naturales con diferentes fórmulas climáticas, ubicadas en los estados de Nuevo León y Coahuila. Se construyeron curvas de vulnerabilidad a la cavitación midiendo el porcentaje

de pérdida de conductividad (PPC) con lo que se obtuvieron los parámetros específicos de dichas curvas como son el potencial hídrico al cual se pierde el 50% de la conductividad (Ψ_{50}), la tasa de pérdida de la conductividad (a) y la conductividad hidráulica específica (Kh_s) e hidráulica máxima (Kh_{max}). La comparación entre estos parámetros para las poblaciones de La Tapona, Galeana, NL, Los Lirios, Arteaga, Coahuila y Cuauthémoc, Saltillo, Coahuila., resultó en la formación de un grupo significativamente menos resistente de acuerdo al coeficiente de correlación de Pearson ($P < 0.05$) a la cavitación conformado por las poblaciones de los Lirios y Tapona, que la población Cuauthémoc. En la segunda etapa de este estudio, se obtuvieron treinta y dos variables de entorno para las poblaciones en estudio, de estas variables tres correspondieron a características dasométricas, cuatro fisiológicas, cinco topológicas y las restantes veinte fueron derivadas de componentes meteorológicos. Aunque los resultados obtenidos mostraron diferencias climáticas marcadas en todas las variables para las tres poblaciones, las poblaciones Tapona y Lirios son agrupadas de forma separada a la población Cuauthémoc, población que presenta mayores limitantes de desarrollo de acuerdo a las condiciones climáticas. La mayor resistencia a la cavitación en la población Cuauthémoc está relacionada de forma positiva y proporcional ($P < 0.05$), al incremento de temperaturas mínimas, radiación solar y días libres de heladas, mientras que la precipitación, temperatura máxima y la pendiente, presentan una incidencia proporcional negativa ($P < 0.05$) en el parámetro b (Ψ_{50}).

SUMMARY

RELATIONSHIP BETWEEN CLIMATIC VARIABLES AND VULNERABILITY TO XYLEM CAVITATION OF THREE NATURAL STANDS OF *Pinus greggii* var. *greggii* ENGELM

BY

FERNANDO GALINDO GARCÍA

MASTER OF SCIENCES IN PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COHAUILA. JUNE 2015.

Eladio Heriberto Cornejo Oviedo. Ph. D. -Advisor -

Index words: *Pinus greggi*, xilematic embolism, water stress, topological, weather.

In this study, an analysis was conducted about relationships between physiological variables related to water stress and environmental variables for *Pinus greggii* var. *greggii* Engelm. This specie was selected because is an endemic pinaceae of Mexico, with high productive potential and is considered resistant specie to adverse environmental conditions. Xylem embolism was measured for three natural populations with different climatic formulas that are located in Coahuila and Nuevo Leon states. Cavitation

vulnerability curves were constructed by measuring the percentage of loss of conductivity (PPC) in order to obtain specific parameters of these curves, such as water potential at which 50% of the conductivity is lost (Ψ_{50}), the rate conductivity loss (a) and the specific hydraulic conductivity (Kh_s) and hydraulic maximum conductivity (Kh_{max}). The comparison of these parameters between the populations located in La Tapona, Galeana, NL, Lirios, Arteaga, Coahuila and Cuauthémoc, Saltillo, Coahuila., resulted in the formation of a significantly less drought resistant group, according to the Pearson correlation coefficient ($P < 0.05$) made up of Lirios and Tapona populations, separated of Cuauthémoc population. In the second stage of this study, thirty-two environment variables were obtained for the study populations, of these three were dasometric direct measurements, four physiological, five topological and the remaining twenty were derived from meteorological parameters. Although the results showed differences in climatic variables for all three populations, Lirios and Tapona populations are grouped separately from Cuauthémoc population, which has major development restrictions according to weather conditions. The greater resistance to cavitation of Cuauthémoc population is positive and proportionally related ($P < 0.05$) to the increase of minimum temperature, solar radiation and frost-free days, while precipitation variables, maximum temperature and topographic slope have a negative proportional incidence in parameter b (Ψ_{50}).

INDICE

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
Artículo 1	
VULNERABILIDAD A LA CAVITACIÓN XILEMÁTICA DE TRES POBLACIONES NATURALES DE <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> ENGELM.	4
RESUMEN	4
SUMMARY	6
INTRODUCCIÓN.....	7
MATERIALES Y MÉTODOS	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
CONCLUSIONES.....	20
AGRADECIMIENTOS.....	20
BIBLIOGRAFÍA.....	20
Artículo 2	
RELACIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS Y TOPOLÓGICAS CON LA CAVITACIÓN XILEMÁTICA DE TRES POBLACIONES NATURALES DE <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> ENGELM	27
RESUMEN	27
SUMMARY	28
INTRODUCCIÓN.....	29
MATERIALES Y MÉTODOS	30
Área de estudio	30
Índices de productividad forestal	34
Obtención de parámetros fisiológicos y morfológicos	37
Análisis estadístico.....	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
CONCLUSIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50

DISCUSIÓN GENERAL.....	55
CONCLUSIONES GENERALES	58
BIBLIOGRAFÍA GENERAL	59
APÉNDICE.....	61

INDICE DE CUADROS

Página

Artículo 1

Cuadro 1. Promedios y significancias para los parámetros de eficiencia hídrica de tres poblaciones de *Pinus greggi* var. *greggii*. 15

Artículo 2

Cuadro 1. Características de las estaciones meteorológicas para el área en estudio.. 33

Cuadro 2. Variables analizadas para las tres poblaciones de *P. greggii* en estudio... 38

Cuadro 3. Matriz de correlación para las variables seleccionadas. 41

Cuadro 4. Factores por componente para las variables bajo estudio. 42

INDICE DE FIGURAS

Página

Artículo 1

Figura 1. Distancias en longitud entre las poblaciones de <i>Pinus greggii</i> var <i>greggii</i> . Datum WGS84, proyección UTM Zona 14, distancia de 20 km entre puntos UTM (+).	9
Figura 2. Distribución geográfica de las poblaciones bajo estudio.....	10
Figura 3. Vulnerabilidad a la cavitación xilemática para las poblaciones (A) Lirios, Arteaga, Coahuila, (B) Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila y (C) La Tapon, Galeana, N.L., determinada por el porcentaje de pérdida de conductividad en el xilema en función del potencial hídrico.....	14
Figura 4. (A) Coeficiente <i>a</i> , (B) coeficiente <i>b</i> , (C) conductividad hidráulica específica <i>Kh_s</i> y (D) conductividad hidráulica máxima <i>Kh_{max}</i> , de tres poblaciones de <i>Pinus greggii</i> var. <i>greggii</i> (promedio ± error estándar). Letras iguales no indican diferencia estadística (Tukey, 0.05).	17

Artículo 2

Figura 1. Distribución geográfica de tres poblaciones de <i>P. greggii</i> en estudio.....	31
Figura 2. Distribución geográfica de 27 estaciones climatológicas del SMN y 8 estaciones climatológicas del INIFAP con influencia sobre las tres poblaciones naturales de <i>P. greggii</i> en estudio.	32
Figura 3. Ejemplo de interpolación IDW para temperatura (A) y precipitación (B) de datos climáticos para las poblaciones Lirios y Cuauthémoc.....	34
Figura 4. Grados de exposición en grados y pendiente en porcentaje para las poblaciones de <i>P. greggi</i> en estudio.....	36
Figura 5. Radiación anual ($\text{kW h m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) para las poblaciones de <i>P. greggi</i> en estudio.	37
Figura 6. Porcentaje de la varianza explicada por componente principal desarrollado.	43
Figura 7. Componentes principales para variables climáticas y fisiológicas para las poblaciones naturales de <i>P. greggii</i> en estudio.	44

Figura 8. Patrones de distribución de variables climáticas y fisiológicas dentro de los Componentes 1 y 2 (A), 2 y 3 (B) y 1 y 3 (C) para tres poblaciones naturales de *P. greggii* en estudio..... 46

Figura 9. Comportamiento de los pesos de variables fisiológicas para un Análisis de Componentes Principales para tres poblaciones naturales de *P. greggii* en estudio.. 47

Figura 10. Coeficientes de correlación significativos a un $P < 0.05$ entre las variables estudiadas y el coeficiente b (Ψ_{50}) para tres poblaciones naturales de *P. greggii* en estudio. 49

INTRODUCCIÓN GENERAL

Se estima que el cambio climático para México, esté asociado principalmente a tres componentes para ambientes terrestres: cambios en precipitación, incremento de temperatura y eventos climáticos extremos (IPCC, 2014). Podría entonces disminuir la precipitación media anual hasta en un 16% e incrementarse hasta en 3.6 °C la temperatura media anual (Villiers y Trejo, 2000; IPCC, 2007; Conde *et al.*, 2010; Karmalkar y Bradley, 2011). Existen escenarios probables donde la tasa de cambio climático exceda las tasas de migración geográfica para la mayor parte de las especies de plantas, siendo sólo aquellas con los mejores mecanismos de sobrevivencia las que prosperen en los nuevos ambientes (Thuiller *et al.*, 2005; Fitzpatrick *et al.*, 2008), también se hace factible la ocurrencia de procesos de extinción, que disminuirán a su vez los servicios ambientales asociados (Neilson *et al.*, 2005).

Estas proyecciones de cambio en la climatología, hacen necesario considerar estrategias potenciales para adaptación al cambio climático, la migración asistida de especies vegetales se ha descrito como efectiva en costos y de alto impacto (Gray *et al.*, 2011). En México se plantaron 3'026,734 ha entre los años 1993 y 2009 con fines de conservación y restauración de ecosistemas forestales, y el 40% corresponden a especies del género *Pinus* cuyo porcentaje de sobrevivencia aproximado es menor al 50% (SEMARNAT, 2002; SEMARNAT, 2004; CONAFOR, 2006; 2007; 2009; 2010).

La especie seleccionada para el presente trabajo fue *Pinus greggii* Engelm., que es una especie endémica de México con altas tasas de crecimiento bajo condiciones de estrés hídrico (Vargas y Muñoz, 1988) que se encuentra naturalmente en suelos pobres, arcillosos y pedregosos, en variadas condiciones topográficas y en altitudes que inician en los 1,200 hasta más de 2,200 msnm (Plancarte-Barrera, 1990); por lo que se ha establecido exitosamente donde plantaciones forestales de otras coníferas no han prosperado, plantándose experimentalmente en Chile, Colombia, Brasil y Sudáfrica (Dvorak y Donahue, 1993). El establecimiento comercial en Sudáfrica es del orden de 1,000 hectáreas por año (Kietzka *et al.*, 1996). La variedad *greggii* además presenta índices de sobrevivencia superiores al 75% (Cornejo-Oviedo *et al.*, 2006; Valencia-Manzo *et al.*, 2006a) en condiciones naturales que superan el nivel de éxito considerado en proyectos de reforestación.

El efecto combinado de altas temperaturas y baja precipitación provoca en las plantas la ruptura de la columna de agua en el tejido xilemático (Cochard, 2006), esta inicia con la inclusión de émbolos de aire en las traqueidas que disminuyen progresivamente la capacidad conductiva del tejido, conduciendo al fenómeno de cavitación (Sperry y Tyree, 1988; Jarbeau *et al.*, 1995). La resistencia a la cavitación es directamente asociada a la capacidad de las plantas para sobrevivir a la sequía (Tyree y Sperry, 1989; Tyree y Ewers 1991; Cochard, 1992).

Los objetivos de la presente investigación fueron la construcción de curvas de vulnerabilidad al embolismo xilemático para tres poblaciones naturales de *Pinus greggii* var. *greggii* (La Taponá, Galeana, Nuevo León, Los Lirios, Arteaga, Coahuila y Cuauthémoc, Saltillo, Coahuila) y la determinación de los factores climáticos y

topológicos principales que afectan la resistencia intraespecífica al estrés hídrico; analizando un clúster de treinta y dos variables obtenidas y calculadas para tres poblaciones naturales de *Pinus greggii* var *greggii*, en los estados de Nuevo León y Coahuila. De estas variables tres corresponden a características dasométricas, cuatro fisiológicas, cinco topológicas y las restantes veinte son derivadas de componentes meteorológicos

El cumplimiento de este objetivo se presenta en dos etapas, cada una asignada a un trabajo distinto, el primero se refiere a la construcción de las curvas de vulnerabilidad a la cavitación xilemática y en el segundo se analizan los resultados de estas curvas con respecto a variables climáticas y topológicas.

**VULNERABILIDAD A LA CAVITACIÓN XILEMÁTICA DE TRES
POBLACIONES NATURALES DE *Pinus greggii* var. *greggii* ENGELM.**

**XYLEM CAVITATION VULNERABILITY OF THREE NATURAL
POPULATIONS OF *Pinus greggii* var. *greggii* ENGELM. ****

**Fernando Galindo-García*, Eladio Heriberto Cornejo-Oviedo, Alejandro
Zermeño-González, Rosalinda Mendoza-Villarreal.**

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro #1923,
Buenavista, Saltillo, Coahuila. C.P. 25315. México Teléfono: (844)4110200 y Fax:

(844) 4110200

*Autor para correspondencia: fgalindo@outlook.com

RESUMEN

Los programas de reforestación deben contemplar la dinámica poblacional derivada del cambio climático y prever el establecimiento de las especies mejor adaptadas a las futuras condiciones de estrés hídrico-térmico. El presente trabajo analiza indirectamente la capacidad del *Pinus greggii* var. *greggii* Engelm para resistir la sequía con base en la vulnerabilidad a la cavitación determinada mediante pruebas de conductividad. Se analizaron tres poblaciones de *P. greggii* ubicadas en un gradiente costa-continente: La

** De acuerdo al formato de la Revista Fitotecnia Mexicana

Tapona, Galeana, Nuevo León, Cañón de Los Lirios, Arteaga y Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. Utilizando el método de inyección de aire, se construyeron curvas de vulnerabilidad xilemática donde el porcentaje de pérdida de conductividad (PPC), se obtuvo a partir de la conductividad inicial y las subsecuentes ajustando los datos a un modelo sigmoideal, calculando la relación de cambio entre la presión aplicada (Ψ) y PPC calculada como a (pendiente) y la presión a la cual se pierde el 50% de conductividad se calculó como intercepto b (Ψ_{50}). Los parámetros a , b y las conductividades hidráulica específica (Kh_s) y máxima (Kh_{max}) para cada rama, mostraron diferencias estadísticamente significativas para las poblaciones en estudio, sin mostrar correlación entre las variables Kh_{max} , Kh_s y Ψ_{50} . Los árboles de la población Cuauhtémoc presentaron un mayor potencial de adaptación a condiciones de estrés hídrico atribuido probablemente a su posición geográfica y a los bajos niveles de precipitación respecto a las demás poblaciones en estudio. Los rangos en los potenciales hídricos se relacionan inversamente con los resultados para Ψ_{50} en las tres poblaciones; altos valores para a en las poblaciones Lirios y Tapona, resultan en bajos valores de Ψ_{50} ; bajos valores de a para la población Cuauhtémoc conllevan valores mayores de Ψ_{50} , que indican una distribución distinta del tamaño de los poros en las traqueidas.

Palabras clave: *Pinus greggi*, cavitación, curvas de vulnerabilidad, estrés hídrico, sequía.

SUMMARY

This paper analyzed the indirect capacity of *Pinus greggii* var. *greggii* Engelm to drought avoidance based on vulnerability to cavitation measured by conductivity tests. Three populations of *P. greggii* were analyzed in a coast-continent gradient: La Tapona, Galeana, Nuevo León, Cañón de los Lirios, Arteaga, Coahuila and Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. Using air injection method, xylem vulnerability curves were constructed and the percentage of loss conductivity (PPC) was obtained from the initial conductivity and subsequent loss. The data was adjusted to a sigmoidal model; the parameter a (slope) was calculated with the ratio of exchange between the pressure applied (Ψ) and PPC, and the parameter b (intercept) was calculated as the pressure which 50% of the conductivity is lost (Ψ_{50}). The parameters a , b and the specific (Kh_s) and maximum (Kh_{max}) hydraulic conductivities for each branch, showed statistically significant differences among populations; no correlation was found among the variables Kh_{max} , Kh_s and Ψ_{50} . Trees from Cuauhtémoc population showed a better adaptation to water stress conditions likely attributable to its geographical position and low levels of precipitation compared to the other two study populations. The ranges in water potentials were inversely related to the results for Ψ_{50} in the three populations, high values of a in the population Lirios and Tapona result in low values of Ψ_{50} , while low values of a in Cuauhtémoc involve higher values of Ψ_{50} , which indicate a different distribution of pore size in the tracheids.

Index words: *Pinus greggii*, cavitation, vulnerability curves, drought stress, drought.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las proyecciones de cambio climático realizadas para México coinciden en señalar incrementos en temperatura de alrededor de 2 °C y una disminución de más del 7% de la precipitación media actual en los próximos 50 años (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 2000; IPCC, 2007; Conde *et al.*, 2010). Bajo estas condiciones se prevé la migración geográfica de un porcentaje variable de especies vegetales con los mejores mecanismos de supervivencia (Thuiller *et al.*, 2005; Fitzpatrick *et al.*, 2008); los mecanismos clave involucrados en la migración exitosa para especies de *Pinus* son: semillas de masa pequeña, periodos juveniles cortos, conos seróticos, baja tolerancia al fuego, altas latitudes y que ocurran en plantaciones no naturales (Higgins y Richardson, 1998).

El efecto combinado de altas temperaturas y baja precipitación provoca en las plantas la ruptura de la columna de agua en el tejido xilemático (Cochard, 2006), esta inicia con la inclusión de émbolos de aire en las traqueidas que disminuyen progresivamente la capacidad conductiva del tejido, conduciendo al fenómeno de cavitación (Sperry y Tyree, 1988; Jarbeau *et al.*, 1995). La resistencia a la cavitación está directamente asociada a la capacidad de las plantas para sobrevivir a la sequía (Tyree y Sperry, 1989; Tyree y Ewers 1991; Cochard, 1992).

Es por esto que los programas de reforestación deben contemplar la dinámica poblacional derivada del cambio climático, y prever el establecimiento de especies mejor adaptadas a las futuras condiciones de estrés hídrico-térmico, ya que en México se han plantado 3'026,734 ha entre los años 1993 y 2009 con fines de conservación y restauración de ecosistemas forestales, y el 40% corresponden a especies del género *Pinus* cuyo

porcentaje de sobrevivencia es menor al 50% (SEMARNAT, 2002 y 2004; CONAFOR, 2008; 2009 y 2010).

El *Pinus greggii* var *greggii* Engelm es una especie endémica de México con altas tasas de crecimiento bajo condiciones de estrés hídrico (Vargas y Muñoz, 1988) por lo que se ha establecido exitosamente donde plantaciones forestales de otras coníferas no han prosperado (Dvorak y Donahue, 1993). La variedad *greggii* presenta índices de supervivencia superiores al 75% (Cornejo-Oviedo *et al.* 2006; Valencia-Manzo *et al.* 2006a) en condiciones séricas y suelos pobres superando el nivel de éxito considerado en proyectos de reforestación.

En el presente trabajo se analiza indirectamente la capacidad del *Pinus greggii* var. *greggii* para resistir a la sequía con base en su vulnerabilidad a la cavitación, mediante el uso de inyección de nitrógeno y pruebas de conductividad. El objetivo fue elaborar curvas de vulnerabilidad xilemática que permitan diferenciar de forma indirecta, tres poblaciones de *Pinus greggii* var *greggii* en cuanto a su respuesta al estrés hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se elaboró una matriz de distancias longitudinales entre poblaciones de *Pinus greggii* (Figura 1), para buscar poblaciones ubicadas en un gradiente costa-continente; se eligieron tres poblaciones naturales de *P. greggii*: La Tapona (100° 5' 60" W y 24° 44' N), Galeana, Nuevo León, Cañón de Lirios (100° 30' 60" W y 25° 23' N), Arteaga y Cuauhtémoc (100° 55' 6" W y 25° 17' 17" N), Saltillo, Coahuila (Figura 2), estas poblaciones cumplen con tres características básicas: separación longitudinal de al menos 50 km entre cada una, condiciones climáticas diferentes según vectoriales 1:250,000 de la Serie II del INEGI (Tapona: BSok(x'), Lirios: BS1k(x') y Cuauhtémoc: BS1kw) con diferentes intervalos de

precipitación anual (Tapona: 600-700 mm año⁻¹, Lirios: 500-600 mm año⁻¹ y Cuauhtémoc: 400-500 mm año⁻¹).

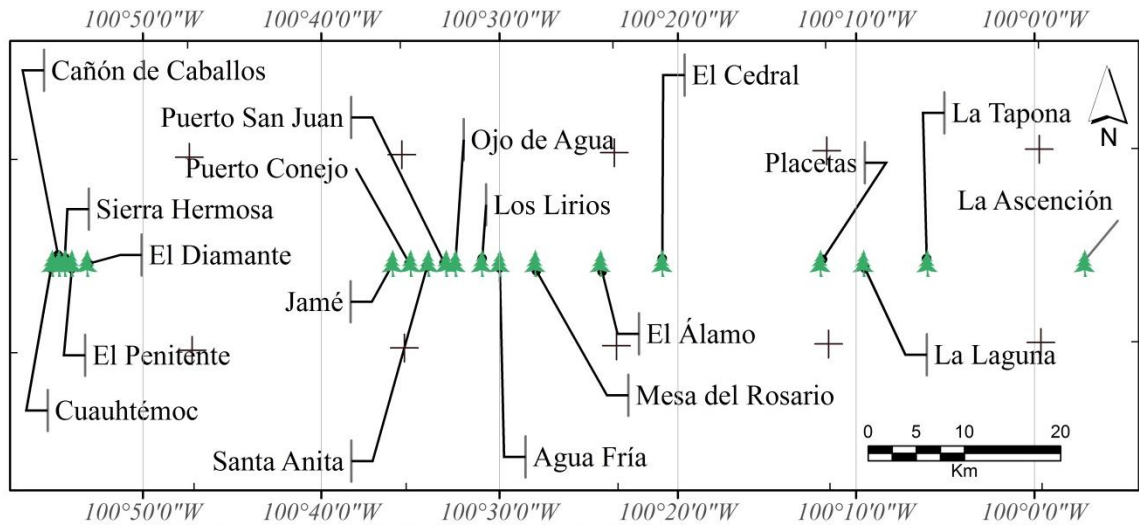


Figura 1. Distancias en longitud entre las poblaciones de *Pinus greggii* var *greggii*. Datum WGS84, proyección UTM Zona 14, distancia de 20 km entre puntos UTM (+).

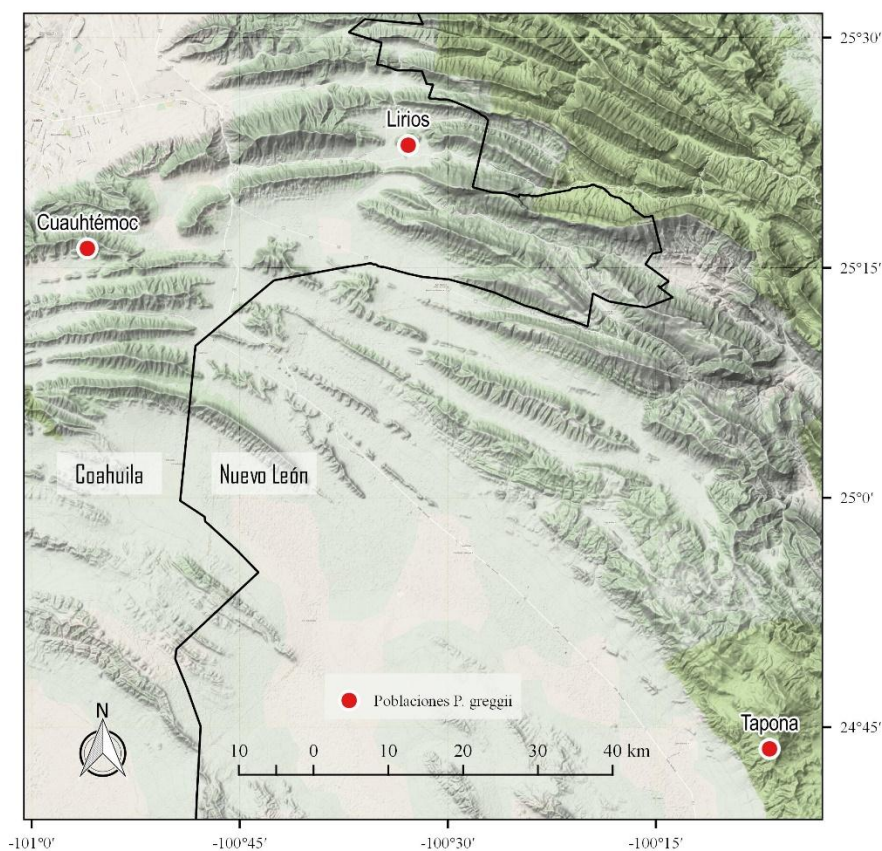


Figura 2. Distribución geográfica de las poblaciones bajo estudio.

Se realizaron muestreos durante los meses de junio y julio de 2010 y agosto de 2011. Se seleccionaron 10 árboles por población con base en características de dominancia (dosel con mayor altura total y con más del 80% de exposición al sol) y co-dominancia (dosel entremezclado y expuesto al sol entre un 50-80%), estado sanitario (ausencia de agallas, tumores o insectos), separación mínima de 50 m entre sí para evitar parentesco, troncos no bifurcados y con exposición norte. De la parte superior del dosel de cada árbol se colectaron 5 ramas de 50 cm de longitud por 0.5 cm de diámetro, que fueron transportadas al laboratorio en bolsas plásticas selladas para evitar pérdidas extremas de humedad y colocadas sobre hielo para disminuir el crecimiento de hongos. En laboratorio

estas ramas fueron saturadas durante 2 horas en agua destilada a 4 °C para facilitar la separación de la corteza secundaria del cambium vascular para su posterior conexión a las tuberías del dispositivo para medir conductividad hidráulica. Siguiendo el método de Sperry *et al.* (1988), mediante un acumulador de presión y una cámara de cavitación PMS 1000®, a segmentos de 15 cm sin presencia de nudos ni hojas, se les aplicó agua (acidificada a un pH de 2 con HCl al 4% y filtrada a 0.22 µm para evitar partículas y crecimiento microbiano en el dispositivo) a una presión constante de 0.1 MPa durante una hora, a fin de remover émbolos de aire en el tejido xilemático provenientes de las condiciones de campo. Para obtener la conductividad hidráulica, los segmentos de 15 cm se conectaron a una columna de agua acidificada de 1 m de altura, que desarrolló una presión aproximada de 10 kPa, durante un periodo de 15 minutos se colectó el agua resultante en frascos con algodón pesados previamente para obtener un diferencial de volumen; la conductividad hidráulica se calculó en función del flujo desarrollado (Ecuación 1):

$$F = \frac{\Delta V}{\Delta t} = kh \left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right) \quad (1)$$

Donde V se refiere al volumen obtenido, t =tiempo=900 s, P =presión aplicada=10 kPa, Kh es la conductividad hidráulica ($\text{kg m}^{-1} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) y l =longitud de la rama=15 cm.

Se utilizó el método de Cochard *et al.* (1992) y Sperry y Saliendra (1994) de inyección de aire para construir las curvas de vulnerabilidad xilemática. Después de la medición inicial de conductividad hidráulica (k_{max}), a cada rama se le hicieron cortes superficiales para facilitar la entrada de aire en las traqueidas, después se inyectó nitrógeno

de alta pureza a las ramas, utilizando la cámara de presión PMS 1000® durante periodos de 10 min a presiones crecientes (1-6 MPa); después de cada inyección se midió la conductividad hidráulica restableciendo el flujo de agua a través de la rama, por periodos de 15 min. El porcentaje de pérdida de conductividad (PPC) se obtuvo a partir de la conductividad inicial y las subsecuentes (Ecuación 2):

$$PPC = 100(k_{max} - k_h)/k_{max} \quad (2)$$

Donde Kh_{max} es la conductividad inicial y Kh es la conductividad resultante de la inyección de aire.

Se calculó además, la conductividad hidráulica específica Kh_s ($\text{kg m}^{-2} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) dividiendo la conductividad máxima entre el área de la sección transversal de conducción de la rama ($\pi \cdot r^2$).

Los datos resultantes fueron ajustados al modelo sigmoideal exponencial propuesto por Pammenter y Vander-Willigien (1998) (Ecuación 3):

$$PPC = \frac{100}{1 + e^{a(\Psi - b)}} \quad (3)$$

Donde a es la relación de cambio entre la presión aplicada (Ψ) y la pérdida en conductividad (PPC) y b es la presión a la cual se pierde el 50% de conductividad (Ψ_{50}).

Se realizó una regresión no lineal con el programa estadístico SAS 9.1® utilizando el PROC NLIN para los datos de cada rama con la cual se obtuvieron los coeficientes a y b . Posteriormente se realizaron pruebas de normalidad de Anderson-Darling, análisis de

varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey para los pares *a-b* obtenidos, utilizando la librería *agricolae* del programa estadístico R-Project versión 2.13.2.

Se construyeron las curvas ajustadas para los promedios árbol-población en el programa SigmaPlot 11.0®, mediante una regresión no lineal (Ecuación 3) que utiliza el método Levenberg-Marquardt, con 200 iteraciones de minimización de diferencias en la suma de cuadrados, para valores observados y predichos, así se determinaron los coeficientes de ajuste por población (Bindslev, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Curvas de vulnerabilidad

Las curvas de vulnerabilidad fueron construidas con promedios de conductividad por árbol y por población. Se ilustran los coeficientes de determinación (R^2) dados para líneas ajustadas mediante el modelo de Pammenter y Vander-Willigien (1998) (Figura 3). Se observó que las curvas obtenidas para las poblaciones Lirios y La Tapona (Figuras 3A y 3C) se presentaron más pronunciadas que la población Cuauhtémoc (Figura 3B), en la cual PPC ocurre en un intervalo mayor de potencial hídrico, disminuyendo así su Ψ_{50} con respecto de las otras poblaciones.

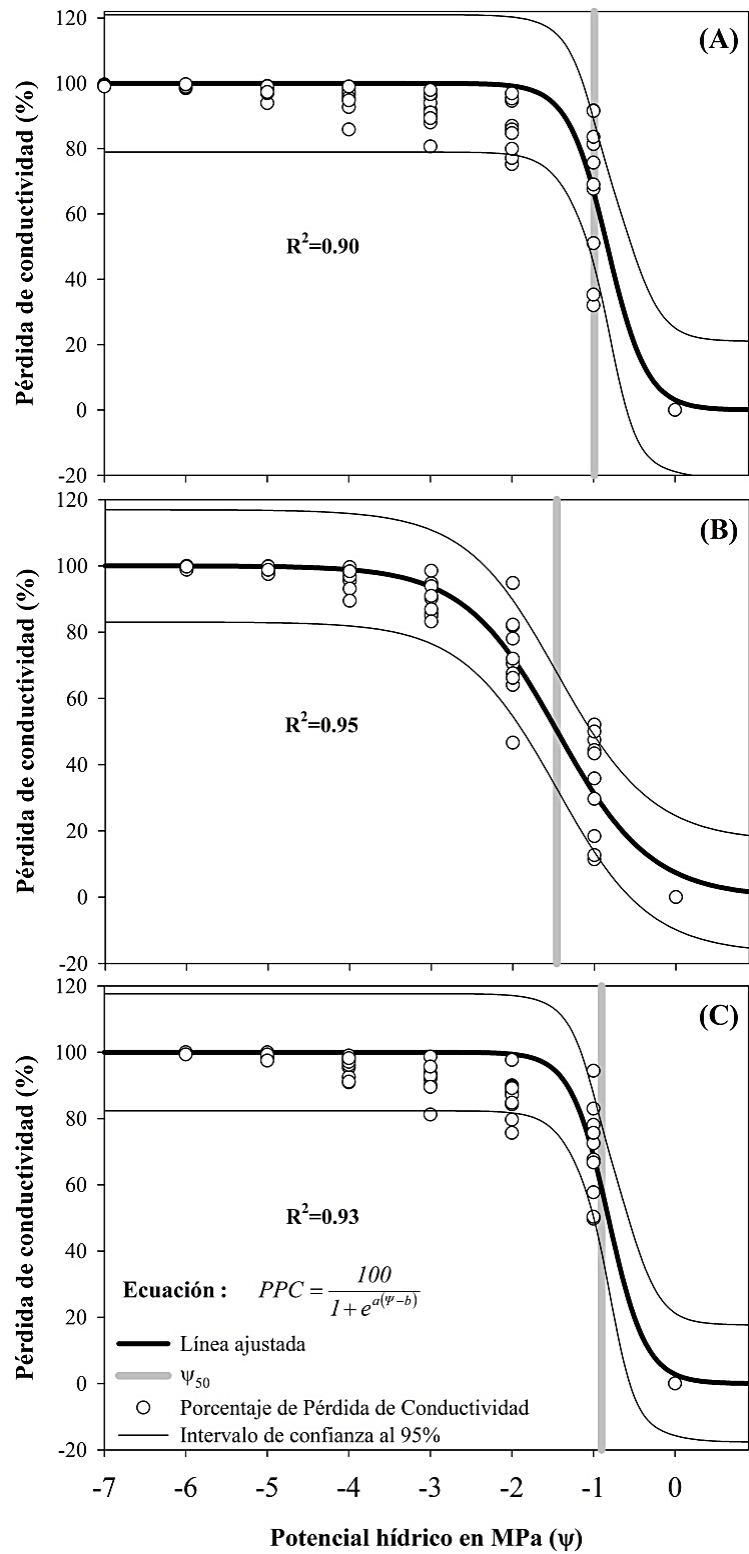


Figura 3. Vulnerabilidad a la cavitación xilemática para las poblaciones (A) Lirios, Arteaga, Coahuila, (B) Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila y (C) La Tapona, Galeana,

N.L., determinada por el porcentaje de pérdida de conductividad en el xilema en función del potencial hídrico.

Parámetros de eficiencia hídrica

El análisis de varianza de los parámetros a y b (Ψ_{50}) obtenidos de la regresión exponencial sigmoidea y las conductividades hidráulica específica (Kh_s) y máxima (Kh_{max}) para cada rama, mostró que existen diferencias estadísticamente significativas entre las poblaciones en estudio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Promedios y significancias para los parámetros de eficiencia hídrica de tres poblaciones de *Pinus greggi* var. *greggii*.

Población	Parámetro hídrico \pm ee				n
	a	$b(\Psi_{50})$	Kh_s	Kh_{max}	
Lirios**	6.78 ± 0.71	-0.99 ± 0.042	0.026 ± 0.0018	$1.62e-05 \pm 1.21e-06$	51
Cuauhtémoc**	2.32 ± 0.16	-1.46 ± 0.045	0.041 ± 0.0027	$2.65e-05 \pm 2.00e-06$	50
Tapona**	5.56 ± 0.53	-0.94 ± 0.049	0.021 ± 0.0019	$1.31e-05 \pm 1.25e-06$	49

** Diferente de cero a una probabilidad de 0.01. a , b , Kh_s , Kh_{max} , n y ee son la pendiente, intercepto, conductividad hidráulica específica en $\text{kg m}^{-2} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$, conductividad hidráulica máxima en $\text{kg m}^{-1} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$, número de muestras y error estándar respectivamente.

No se encontraron valores significativos ($P < 0.05$) de correlación entre las conductividades hidráulica máxima (Kh_{max}), específica (Kh_s) y el parámetro $b(\Psi_{50})$, lo cual es indicador de una débil relación evolutiva o dependiente entre estas variables (Maherali *et al.*, 2004).

Los resultados de las comparaciones entre los parámetros de eficiencia hídrica de las tres poblaciones indicaron que, los árboles de la población Cuauhtémoc presentan un mayor potencial de adaptación a condiciones de estrés hídrico (Figura 4) con respecto a las poblaciones Tapona y Lirios, cuyos parámetros no son estadísticamente diferentes

entre sí, hecho que es consistente con resultados anteriores que agrupan a estas dos poblaciones mediante una evaluación de características morfológicas en un ensayo de procedencias (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008) y por una alta similitud entre sus valores de diversidad genética y de frecuencias alélicas (Parraguirre-Lezama *et al.*, 2002). La similitud en cuanto a potenciales hídricos y coeficientes de eficiencia hídrica entre las poblaciones Lirios y Taponá, coincide también con la agrupación realizada por Rodríguez-Laguna *et al.* (2008), basada en mediciones de altura, diámetro basal y supervivencia en un ensayo de procedencias a los 4.5 años de plantación. Esta agrupación también puede ser explicada por la igualdad estadística en el incremento medio anual en cuanto al área basal (IMAAB) calculado por Velasco-Velasco *et al.* (2012) para una población de Galeana, Nuevo León y la población Lirios. López-Upton *et al.* (2004) reportaron a la población Lirios como la tercera con menor tasa de crecimiento en un ensayo realizado con procedencias de 12 poblaciones de *Pinus greggii* donde las poblaciones de la variedad *australis* respecto de la variedad *greggii* presentan un mayor crecimiento en altura, diámetro y volumen. Sin embargo, aunque la variedad *australis* es más productiva, sus ciclos de crecimiento son menores que los de la variedad *greggii* (Valencia-Manzo *et al.*, 2006b), la cual también posee un mejor balance entre raíz y tallo con un peso seco estadísticamente igual que el de la variedad *australis* a pesar de presentar alturas y diámetros menores (Hernández-Pérez *et al.*, 2001). Estas aseveraciones se ven reforzadas por las diferencias entre los parámetros hídricos calculados y los obtenidos por Velasco *et al.* (Datos sin publicar)* para poblaciones de *P. greggii* var. *australis*; al comparar los coeficientes de la población Cuauhtémoc, con los valores de mayor eficiencia obtenidos para las poblaciones Zacualpan, el Madroño y San Joaquín, se tiene que el coeficiente *b*

de la población Cuauhtémoc es al menos un 66% menor, el coeficiente a presenta un incremento mínimo del 224% y las conductividades hidráulicas máxima y específica son un 60% y 58% mayores, respectivamente (Cuadro 1).

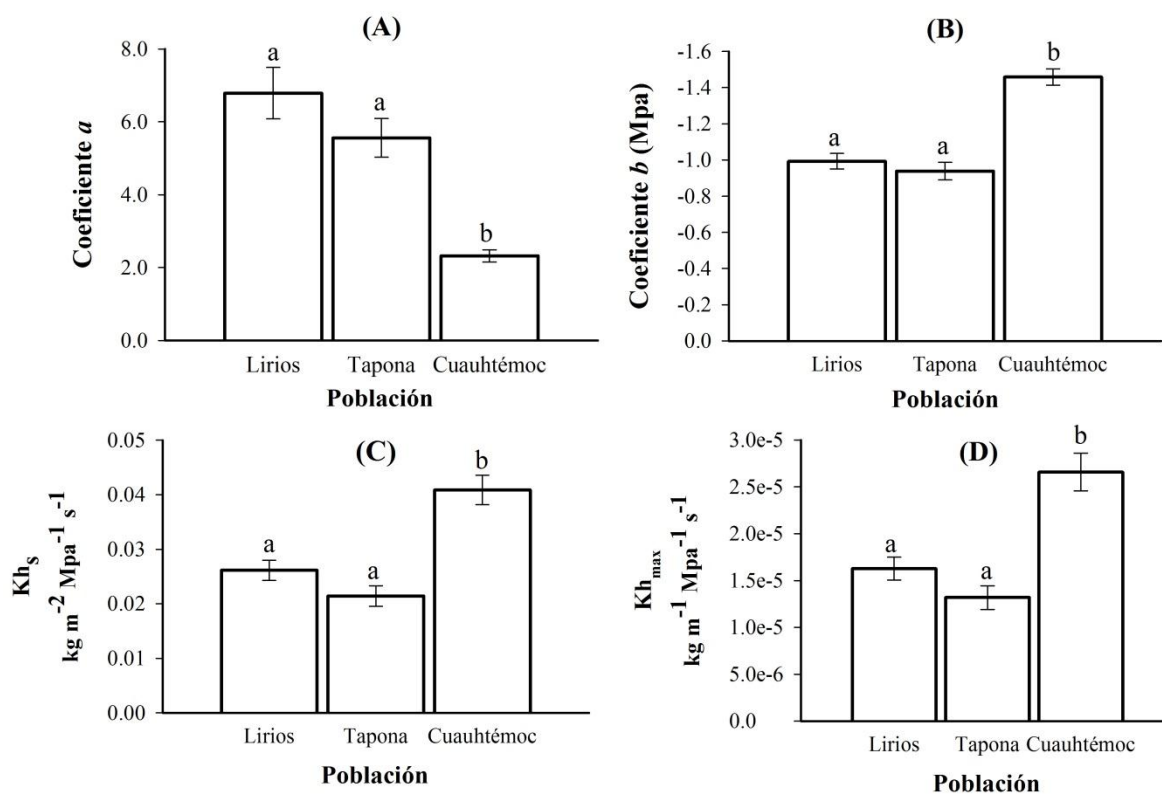


Figura 4. (A) Coeficiente a , (B) coeficiente b , (C) conductividad hidráulica específica Kh_s y (D) conductividad hidráulica máxima Kh_{max} , de tres poblaciones de *Pinus greggii* var. *greggii* (promedio \pm error estándar). Letras iguales no indican diferencia estadística (Tukey, 0.05).

El parámetro a , señala que en la población Cuauhtémoc ($P < 0.05$) ocurre la pérdida de conductividad en un mayor intervalo de potenciales hídricos y por lo tanto, se asocia a una menor vulnerabilidad a la cavitación (Pammenter y Vander, 1998; Corcuera *et al.*, 2011, Cuadro 1). Respecto a esta población, las poblaciones Lirios y Tapona presentan curvas de pérdida de conductividad estadísticamente más pronunciadas, valores menores en cuanto a su conductividad hidráulica máxima, específica y a los valores de su

coeficiente b (Ψ_{50}), estos valores indican que la población Cuauthémoc presenta una resistencia mayor a la cavitación xilemática que puede ser atribuida a su posición geográfica y principalmente, a los bajos niveles de precipitación (<500 mm anual) con respecto de las demás poblaciones en estudio (>500 mm anual), lo cual coincide con Hernández-Pérez *et al.* (2001) que relacionaron una mayor afectación por estrés hídrico en poblaciones de *P. greggii* con mayor potencial de crecimiento (Cuadro 1).

Los intervalos que ocurren en los potenciales hídricos se relacionan inversamente con los resultados para el coeficiente b (Ψ_{50}) en las tres poblaciones (Figura 4B): altos valores para a en las poblaciones Lirios y Tapona resultan en bajos valores del coeficiente b (Ψ_{50}), mientras que los bajos valores de a obtenidos para la población Cuauhtémoc (Figura 4A) conllevan valores mayores de Ψ_{50} , que indican a su vez, una curva menos acentuada y una distribución distinta del tamaño de los poros en los vasos (Pammenter y Vander-Willigien, 1998). Estos altos valores de Ψ_{50} se relacionan inversamente con la longitud del poro en las paredes celulares de los elementos traqueales (Tyree y Sperry, 1989, Hargrave *et al.*, 1994), esta razón de cambio fue confirmada por Reyes-Santamaría *et al.* (2002) para árboles de *Persea americana* Mill.

Sin embargo, los resultados de Kh_s y Kh_{max} (Figuras 4C y 4D) difieren con respecto de las relaciones encontradas por Cochard *et al.* (1992), Martínez-Vilalta *et al.* (2002) y Corcuera *et al.* (2011), donde una alta resistencia a la cavitación está asociada con baja conductividad específica en los tallos y bajos valores de pendiente de las curvas. No obstante, estos valores de Kh_s obtenidos pueden ser explicados por la baja densidad en las punteaduras de las traqueidas, determinando así los bajos valores Ψ_{50} resultantes (Dalla-Salda *et al.*, 2011). Recientemente, Delzon *et al.* (2010) soportan la hipótesis de que la

*Ing. Froylán Velasco Velasco, Ingeniería en Sistemas de Producción, Departamento de Riego y Drenaje, Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Saltillo, Coahuila.

resistencia a la cavitación es una función de la flexibilidad del margo y su sobreposición con el toro de la punteadura areolada de las traqueidas (sellado de la alimentación de aire al capilar) y según Jansen *et al.* (2012) es función directa de la porosidad del toro. Salvo *et al.* (2004), encontraron una fuerte relación entre el diámetro del toro y la longitud del margo con el movimiento transversal de gases; mientras que Pitterman *et al.* (2005) afirman que las punteaduras especializadas de las coníferas son las que permiten la competencia con las angiospermas, disminuyendo la resistencia al flujo hasta 59 veces por unidad de área con respecto de las angiospermas.

Los valores promedio del coeficiente b (Ψ_{50}) encontrados en las tres poblaciones son menores a los encontrados por Delzon *et al.* (2010) para 14 especies de pinos y los citados por Martínez-Vilalta *et al.* (2004) para 47 especies de coníferas; estos resultados ubican a *Pinus greggii* como una de las especies de pino más vulnerables a la cavitación xilemática, por otro lado, el establecimiento de esta especie en ecosistemas semiáridos indica que efectúa mecanismos para solventar este fenómeno, uno de los cuales es el alargamiento de los ciclos de crecimiento y el consecuente incremento en altura del árbol (Salazar-García *et al.*, 1999), este factor se reviste de importancia al considerar que las plantas con altas tasas de crecimiento poseen una mayor resistencia a la cavitación y la única posibilidad de hacer reversible este proceso es mediante el aumento de biomasa (Wang *et al.*, 2003; Dalla-Salda *et al.*, 2011). Otros posibles elementos son la regulación estomática, la porosidad difusa de la madera y la distribución, diámetro y longitud de las traqueidas, factores que pueden conducir a una considerable sobre estimación de la vulnerabilidad xilemática cuando se trabaja con una cámara de presión para inyección de aire a doble salida (Ennajeh *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

Las pruebas de conductividad indican que las poblaciones Lirios y Taponá no presentan diferencias entre sí en cuando a cavitación xilemática, sin embargo estas dos poblaciones de diferencian a su vez de la población Cuauhtémoc. Los resultados sugieren una influencia costa-continente donde las condiciones más xéricas de la población Cuauhtémoc inciden en una mayor eficiencia en el transporte hídrico y en una mayor resistencia a las condiciones de sequía.

El uso de la cámara de inyección PMS denota una sobre estimación de la cavitación con respecto de los intervalos reportados en la literatura para coníferas en general, no obstante este método permite discernir efectivamente entre poblaciones o especies vegetales.

La presente estimación de la eficiencia hídrica servirá de soporte a la planeación y elaboración de los planes de reforestación públicos y privados.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento del proyecto UAAAN exp. 2793 y al Laboratorio de Ciencias Exactas de la UAAAN por las facilidades otorgadas.

BIBLIOGRAFÍA

Bindslev N (2009) Chapter 9: Plots, fits, and data interpretation *In: Drug-Acceptor Interactions*. CoAction Publishing, USA. Dirección web consultada al 15 de mayo de 2014:

<http://journals.sfu.ca/coactionbks/index.php/Bindslev/rt/SuppFiles/13/60>

Cochard H (2006) Cavitation in trees. *Comptes rendus Physique* 7:1018–1026.

- 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.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2010)** Evaluación Externa de los Apoyos de Reforestación, Ejercicio fiscal 2009. Universidad Autónoma Chapingo. México. 140 pp.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2009)** Reforestación, Evaluación Externa Ejercicio Fiscal 2008. Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 197 pp.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2008)** Reforestación, Evaluación Externa Ejercicio Fiscal 2007. Colegio de Posgraduados. México. 102 pp.
- Conde C, F Estrada, B Martínez, O Sánchez, C Gay (2010)** Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24(1):125-140.
- Corcuera L, H Cochard, E Gil-Pelegrin, E Notivol (2011)** Phenotypic plasticity in mesic populations of *Pinus pinaster* improves resistance to xylem embolism (P₅₀) under severe drought. *Trees* 25:1033-1042.
- Cornejo-Oviedo E H, R Vela-Moya, S Valencia-Manzo (2006)** Sobrevivencia y crecimiento de una prueba de progenie de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila. Libro Científico Anual Agricultura, Ganadería y Ciencia Forestal UAAAN-2006. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. pp: 186-191.
- Dalla-Salda G, A Martínez-Meier, H Cochard, P Rozenberg (2011)** Genetic variation of xylem hydraulic properties shows that wood density is involved in adaptation

to drought in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)). *Annals of Forest Science* 68:747-757.

Delzon S, C Douthe, A Sala, H Cochard (2010) Mechanism of water-stress induced cavitation in conifers: bordered pit structure and function support the hypothesis of seal capillary-seeding. *Plant Cell and Environment* 33:2101-2111.

Dvorak W S, J K Donahue (1993) Reseña de investigaciones de la Cooperativa CAMCORE 1980-1992. Traducc. Meneses, J. Departamento Forestal, Universidad Estatal de Carolina del Norte. USA. 94 p.

Ennajeh M, F Simões, H Khemira, H Cochard (2011) How reliable is the double-ended pressure sleeve technique for assessing xylem vulnerability to cavitation in woody angiosperms?. *Physiologia Plantarum* 142:205-210.

Fitzpatrick M, D A Gove, N J Sanders (2008) Climate change, plant migration, and range collapse in a global biodiversity hotspot: the Banksia (Proteaceae) of Western Australia. *Global Change Biology*. 14:1337–1352.

Hargrave K R, K J Kolb, F W Ewers, S D Davis (1994) Conduit diameter and drought-induced embolism in *Salvia mellifera* Greene (Labiatae). *New Phytologist* 126:695-705.

Higgins S I, D M Richardson (1998) Pine invasions in the southern hemisphere: modelling interactions between organism, environment and disturbance. Kluwer Academic Publishers 135:79-93.

Hernández-Pérez C, JJ Vargas-Hernández, C Ramírez-Herrera, A Muñoz-Orozco (2001) Variación geográfica en la respuesta a la sequía en plántulas de *Pinus greggii* Engelm. *Revista de Ciencia Forestal en México* 26(89): 60 p.

- Jansen S, J B Lamy, R Burlett, H Cochard, P Gasson, S Delzon (2012)**
Plasmodesmatal pores in the torus of bordered pit membranes affect cavitation resistance of conifer xylem. *Plant, Cell and Environment* 35:1109-1120.
- 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-Upton J, C Ramírez-Herrera, O Plascencia-Escalante, J Jasso-Mata (2004)**
Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38:457-464.
- Maherali H, W T Pockman, R B Jackson (2004)** Adaptive variation in the vulnerability of woody plants to xylem cavitation. *Ecology* 85 (8):2184-2199.
- Martínez-Vilalta J, E Prat, I Oliveras, J Piñol (2002)** Xylem hydraulic properties of roots and stems of nine Mediterranean woody species. *Oecologia* 133:19-29.
- Martínez-Vilalta J, A Sala, J Piñol (2004)** The hydraulic architecture of Pinaceae-a review. *Plant Ecology* 171:3-13.
- Pammenter N W, C Vander-Willigien (1998)** A mathematical and statistical analysis of the curves illustrating vulnerability of xylem to cavitation. *Tree Physiology* 18:589-593.
- Parraguirre-Lezama C, J J Vargas-Hernández, P Ramírez-Vallejo, H S Azpiroz-Rivero, J Jasso-Mata (2002)** Estructura de la diversidad genética en poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(003): 279-287.

- Pitterman J, J S Sperry, U G Hacke, J K Wheeler, E H Sikkema (2005)** Torus-Margo Pits Help Conifers Compete with Angiosperms. *Science* 310:1924.
- Reyes-Santamaría I, T Terrazas, A F Barrientos-Priego, C Trejo (2002)** Xylem conductivity and vulnerability in cultivars and races of avocado. *Scientia Horticulturae* 92:97-105.
- Rodríguez-Laguna R, S Valencia-Manzo, J Meza-Rangel, M A Capó-Arteaga, A Reynoso-Pérez (2008)** Crecimiento y Características de la Copa de Procedencias de *Pinus greggi* Engelm. En Galeana, Nuevo León. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31(1):19-26.
- Salazar-García J G, J J Vargas-Hernández, J Jasso-Mata, C Ramírez-Herrera, J López-Upton (1999)** Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5:19-34.
- Salvo L, R Ananías, A Cloutier (2004)** Influencia de la estructura anatómica en la permeabilidad específica transversal al gas del Pino Radiata. *Maderas: Ciencia y Tecnología* 6(1):33-44.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2004)** Anuario Estadístico de la Producción Forestal México. Dirección web consultada el 15 de mayo de 2014:
<http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/forestales/Anuarios/Anuario2004.pdf>
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2002)** Superficie reforestada por entidad federativa, 1993-2001. Dirección General de

Estadística e Información Ambiental. México. Dirección web consultada el 15 de mayo de 2014:

http://www.ceiba.org.mx/archivos/semarnat/estadisticas_2000/compendio_2000/03dim_ambiental/03_05_Forestales/data_forestales/CuadroIII.5.4.15.htm

Sperry J S, J R Donnelly, M T Tyree (1988) A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. *Plant Cell and Environment*.11:35-40.

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, M T Tyree (1988) Mechanism of Water Stress-Induced Xylem Embolism. *Plant Physiology*. 88:581-587.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers, p. 2. Approved in detail at IPCC Plenary XXVII in Valencia, Spain. 17 pp.

Thuiller W, S Lavorel, M B Araújo (2005) Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography*. 14:347–357.

Tyree M T, F W Ewers (1991) Tansley Review No. 34. The Hydraulic Architecture of Trees and Other Woody Plants. *New Phytologist*, 119(3):345-360.

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.

Valencia-Manzo S, V Serrano-Ordóñez, E H Cornejo-Oviedo, C Flores-López (2006a) Ensayo de cinco procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila. Libro Científico Anual Agricultura, Ganadería y Ciencia

Forestal UAAAN-2006. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México.
pp:182-185.

- Valencia-Manzo S, M V Velasco-García, M Gómez-Cárdenas, M Ruiz-Muñoz, M A Capó-Arteaga (2006b)** Ensayo de procedencias de *Pinus greggi* Engelm. en dos localidades de la mixteca Alta de Oaxaca, México. Revista Fitotecnia Mexicana 29(1):27-32.
- Vargas-Hernández J J, A Muñoz-Orozco (1988)** Resistencia a sequía: Crecimiento y supervivencia en plántulas de cuatro especies de *Pinus*. Agrociencia 72 (2):197-208.
- Velasco-Velasco V A, J R Enríquez-del Valle, G Rodríguez-Ortíz, G V Campos-Ángeles, M Gómez-Cárdenas, M L García-García (2012)** Evaluación de Procedencias de *Pinus greggii* Engelm. Ex Parl. En Plantaciones De La Mixteca Oaxaqueña. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 3(9):42-50.
- Villers-Ruiz L, I Trejo-Vázquez (2000)** El Cambio Climático Y La Vegetación En México: In: una visión hacia el siglo XXI. Gay-García C (comp). El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma de México. pp:57-59.
- Wang T, S N Aitken, K Kacanagh (2003)** Selection for improved growth and wood quality in lodgepole pine: effects on phenology, hydraulic architecture and growth seedlings. Trees 17:269-277.

**RELACIÓN DE VARIABLES CLIMÁTICAS Y TOPOLÓGICAS CON LA
CAVITACIÓN XILEMÁTICA DE TRES POBLACIONES NATURALES DE
Pinus greggii var. *greggii* ENGELM**

**RELATIONSHIP BETWEEN CLIMATIC AND TOPOLOGIC VARIABLES
AND XYLEM CAVITATION VULNERABILITY OF THREE NATURAL
POPULATIONS OF *Pinus greggii* var. *greggii* ENGELM**

**Fernando Galindo García*, Eladio Heriberto Cornejo Oviedo, Alejandro Zermeño
González, Rosalinda Mendoza Villarreal.**

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro #1923,
Buenavista, Saltillo, Coahuila. C.P. 25315. México Teléfono: (844)4110200 y Fax:
(844) 4110200

*Autor para correspondencia: fgalindo@outlook.com

RESUMEN

Se analiza la relación de la cavitación xilemática con variables de clima y topología para tres poblaciones de *Pinus greggii* var *greggi*, que representan la variabilidad climática de la región norte del país para esta especie: La Tapona, Galeana, N.L., Cañón de Los Lirios, Arteaga, Coah. y Cuauhtémoc, Saltillo, Coah. El principal parámetro de

** De acuerdo al formato de la Revista Fitotecnia Mexicana

resistencia al estrés hídrico (coeficiente b , Ψ_{50}), fue obtenido mediante la construcción de curvas de vulnerabilidad xilemática; este fue relacionado con variables climáticas de precipitación y temperatura interpoladas a partir de datos históricos de estaciones meteorológicas con más de veinticinco años de funcionamiento, las variables topológicas se generaron mediante inferencias a partir de un Modelo Digital de Elevaciones en un Sistema de Información Geográfica. Aunque los resultados muestran marcadas diferencias climáticas en todas las variables para las tres poblaciones, las poblaciones Tapona y Lirios son agrupadas de forma separada a la población Cuauthémoc, población que presenta mayores limitantes de desarrollo de acuerdo a las condiciones climáticas. La mayor resistencia a la cavitación en la población Cuauthémoc es relacionada de forma positiva y proporcional ($P < 0.05$), al incremento de temperaturas mínimas, radiación solar y días libres de heladas, mientras la precipitación, temperatura máxima y la pendiente presentan una incidencia proporcional negativa ($P < 0.05$) en el parámetro b (Ψ_{50}).

SUMMARY

The relationship between xylem cavitation and climatic and topologic variables is discussed for three natural populations of *Pinus greggii* var *greggii* Engelm. wich are representative of the climatic variability of northern region for this specie: La Tapona, Galeana, N.L., Cañón de Los Lirios, Arteaga, Coah. and Cuauhtémoc, Saltillo, Coah. The main parameter of resistance to water stress (coefficient b , Ψ_{50}) was obtained by constructing xylem cavitation vulnerability curves; this parameter was related to temperature and precipitation variables interpolated from historical data of weather stations with over twenty five years of continuous operation, the topological variables

were generated by inferences from a Digital Elevation Model into a Geographic Information System. Although the results showed differences in climatic variables for all three populations, Lirios and Tapona populations are grouped separately from Cuauthémoc population, which has major development restrictions according to weather conditions. The greater resistance to cavitation of Cuauthémoc population is positive and proportionally related ($P < 0.05$) to the increase of minimum temperature, solar radiation and frost-free days, while precipitation variables, maximum temperature and topographic slope have a negative proportional incidence in parameter b (Ψ_{50}).

INTRODUCCIÓN

Los cambios en la precipitación y temperatura, aunados a eventos climáticos extremos con tres de los cuatro componentes principales del cambio climático con incidencia directa en los ecosistemas terrestres (IPCC, 2014). Para México y Centroamérica, los diversos escenarios de cambio climático proyectan una reducción en la precipitación media anual desde un 5 hasta un 16%, y un incremento en las temperaturas hasta de 3.6 °C (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 2000; Conde *et al.*, 2010, Karmalkar y Bradley, 2011). Existen entonces escenarios probables donde la tasa de cambio climático exceda las tasas de migración para la mayor parte de las especies de plantas, siendo posible la ocurrencia de procesos de extinción, que disminuirán a su vez los servicios ambientales asociados (Neilson *et al.*, 2005).

En este contexto, es importante considerar estrategias potenciales para adaptación al cambio climático, la migración asistida de especies vegetales se ha descrito como efectiva en costos y de alto impacto (Gray *et al.*, 2011). En México, los programas públicos de

restauración de áreas forestales a través de reforestación con pináceas, han obtenido índices sobrevivencia en el orden del 50% (Céspedes-Flores y Moreno-Sánchez, 2010), lo que hace necesaria la inclusión en el diseño de especies mejor adaptadas a las futuras condiciones de estrés hídrico-térmico que ocurrirán en los próximos 50 años.

El *Pinus greggii* Engelm es una especie endémica de México con altas tasas de crecimiento bajo condiciones de estrés hídrico (Vargas-Hernández y Muñoz-Orozco, 1988) por lo que se ha establecido exitosamente donde plantaciones forestales de otras coníferas no han prosperado (Dvorak y Donahue, 1993). La variedad *greggii* presenta índices de supervivencia superiores al 75% (Cornejo-Oviedo *et al.*, 2006; Valencia-Manzo *et al.*, 2006) en condiciones naturales que superan el nivel de éxito considerado en proyectos de reforestación.

El objetivo del presente trabajo es analizar la relación de la cavitación xilemática con treinta y una variables obtenidas y calculadas para tres poblaciones naturales de *Pinus greggii* var *greggii*, en los estados de Nuevo León y Coahuila. De estas variables tres corresponden a características dasométricas, cuatro fisiológicas, cinco topológicas y las restantes veinte son derivadas de componentes meteorológicos

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se analizaron tres poblaciones de *P. greggi* de acuerdo a su ubicación en longitud, buscando discernir un gradiente costa-continente. Las poblaciones naturales elegidas fueron: La Tapona (100° 5' 60" LO y 24° 44' LN), Galeana, Nuevo León, Cañón de Lirios (100° 30' 60" LO y 25° 23' LN'), Arteaga y Cuauhtémoc (100° 55' 6" LO y 25° 17' 17"

LN), Saltillo, Coahuila (Figura 1), estas poblaciones cumplen con tres parámetros básicos: separación longitudinal de al menos 50 km entre cada una, fórmulas climáticas diferentes (Taponá: BSok(x'), Lirios: BS1k(x') y Cuauhtémoc: BS1kw) y diferentes rangos de precipitación (Taponá: 600-700 mm año⁻¹, Lirios: 500-600 mm año⁻¹ y Cuauhtémoc: 400-500 mm año⁻¹).

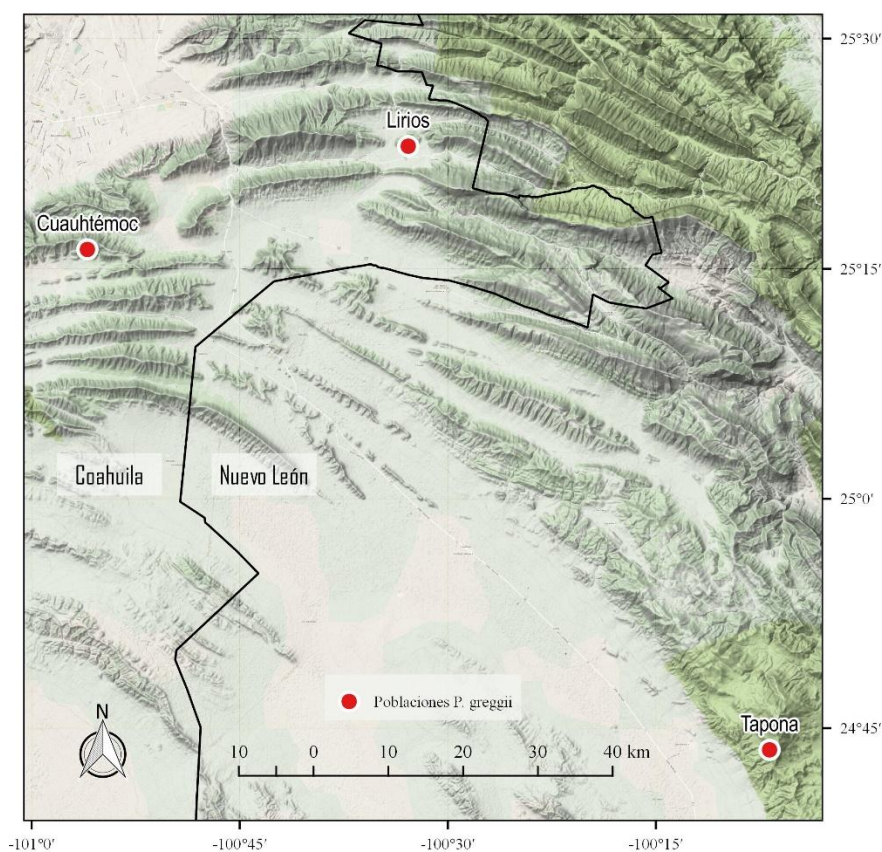


Figura 1. Distribución geográfica de tres poblaciones de *P. greggii* en estudio.

Se recopiló información meteorológica de las interpolaciones corregidas del Atlas Climático Digital de México 2.0 (UNIATMOS, 2011), las estaciones climáticas del Sistema Meteorológico Nacional y de la Red Nacional de Estaciones Estatales

Agroclimatológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (INIFAP, 2011), para los estados de Nuevo León y Coahuila (Figura 2).

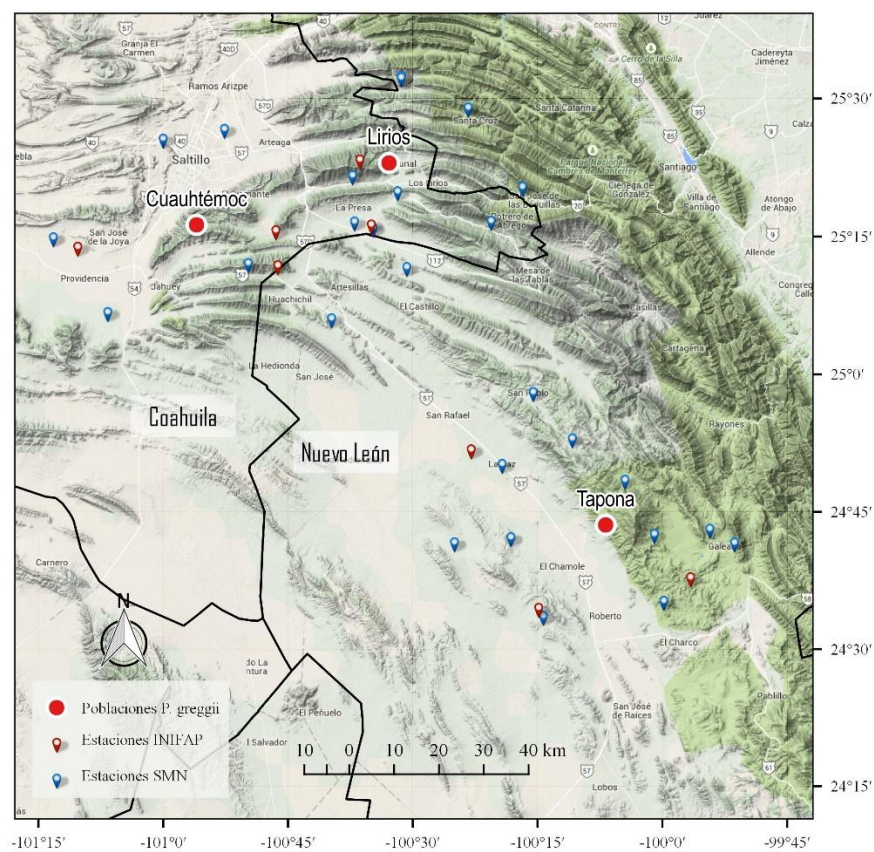


Figura 2. Distribución geográfica de 27 estaciones climatológicas del SMN y 8 estaciones climatológicas del INIFAP con influencia sobre las tres poblaciones naturales de *P. greggii* en estudio.

El control de calidad de los datos obtenidos fue realizado con base en los criterios distancia y años de medición, (cuadro 1) que son adicionales a la permanencia y operación constante de cada estación por lo tanto, se redujo el número de estaciones con datos relevantes desde treinta y cinco hasta diez. Se obtuvieron las normales climáticas para

estaciones con al menos cinco años de funcionamiento continuo y donde la pérdida o falta de registro fuera menor al 10 por ciento del total de datos.

Cuadro 1. Características de las estaciones meteorológicas para el área en estudio.

Población	Clave	Fuente	Nombre	Distancia (Km)	Fecha
Cauhtémoc	5146	SMN	Huachichil	12.7	1980-2007
Cauhtémoc		INIFAP	Emiliano Zapata	16	2008-2012
Cauhtémoc		INIFAP	Rancho Guadalupe	17.8	2008-2012
Lirios	5149	SMN	Ciénega De La Purísima	5.3	1980-2007
Lirios	5176	SMN	Jame	7.6	1984-2007
Lirios		INIFAP	Rancho Roncesvalles	6	2005-20012
Tapona	19155	SMN	La Poza	9.95	1981-2010
Tapona	19085	SMN	Galeana	10.3	1975-2009
Tapona		INIFAP	La Ascensión	19.5	2007-2011
Tapona		INIFAP	San José De Raíces	20.3	2006-2011

Las estaciones resultantes se integraron a una base de datos espacial que fue procesada utilizando la extensión Spatial Analyst del software ArcGis 10.0®, se realizaron interpolaciones espaciales para las variables climáticas de interés bajo el método IDW (Inverse Distance Weighting), de donde se extrajeron los valores puntuales por árbol (Figura 3).

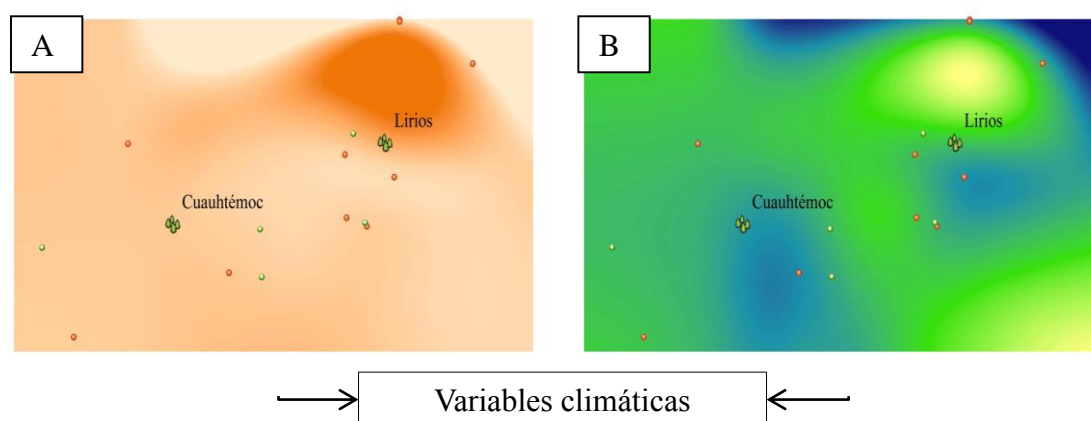


Figura 3. Ejemplo de interpolación IDW para temperatura (A) y precipitación (B) de datos climáticos para las poblaciones Lirios y Cuauthémoc.

Para obtener los días libres de heladas se procesó la climatología diaria disponible, donde el número total de días con registro se escaló a los 365 días del año para así estimar proporción de días sin helada (temperatura media diaria mayor a 4.5 °C), el producto entre este porcentaje y 365 indica la cantidad de días libres de heladas.

Índices de productividad forestal

Para la estimación de la productividad forestal, se utilizó la modificación del índice Paterson de Productividad Forestal propuesta por Gandullo y Serrada (1977) (Ecuación 1):

$$iCVP = \frac{Tv * G * F * Pma}{Ta * 12}$$

(1)

Donde:

$iCVP$ = Índice Modificado de Productividad de Paterson

Tv = Temperatura media del mes más cálido (°C)

G = Periodo de crecimiento, considerando meses con temperatura media mayor a 4 °C y la precipitación media mensual es del doble de la temperatura media.

Pma = Precipitación media anual (mm)

Ta = Diferencia entre la temperatura mensual más alta y la temperatura mensual más baja (°C)

F_i = Factor de insolación, calculado mediante:

$$F_i = \frac{2500}{n + 1000}$$

Donde n = insolación anual media en horas, tomando 24° de latitud Norte para la población La Tapona, y 25° para las poblaciones Lirios y Cuauthémoc.

Posteriormente, se estimó la productividad potencial (PP) utilizando un factor litológico desarrollado por Gandullo y Serrada (1977) para España e integrando el iCVP a la ecuación original de Paterson (Lemieux, 1961) (Ecuación 2):

$$PP = [\log(iCVP) * F_c] - 7.4$$

(2)

Donde:

PP = Productividad potencial ($m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

$iCVP$ = Índice Modificado de Productividad de Paterson

F_c = Factor de corrección litológico, adecuado a la litología reportada en las Cartas Geológicas del INEGI G14-10 Concepción del Oro y G14-7 Monterrey, ambas en escala 1:250,000.

Otras variables integradas fueron la exposición y la pendiente promedio, derivadas de un Modelo Digital del Terreno (MDT) tipo STRM del Continuo de Elevaciones Mexicano 2.0, proporcionado gratuitamente por INEGI, con una resolución de 20 m por pixel (Figura 4). Adicionalmente, se utilizó la extensión Spatial Analyst del software ArcGis 9.2, para obtener la radiación global integrada ($\text{kW h m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) en intervalos mensuales utilizando 30 min de lapso de estimación, con un intervalo de 14 días para el cálculo de sectores del cielo y una resolución de 200 celdas. Esta estimación de radiación se realizó considerando una altura de 25 m sobre el MDT y una latitud media de 25.055 grados decimales (Figura 5).

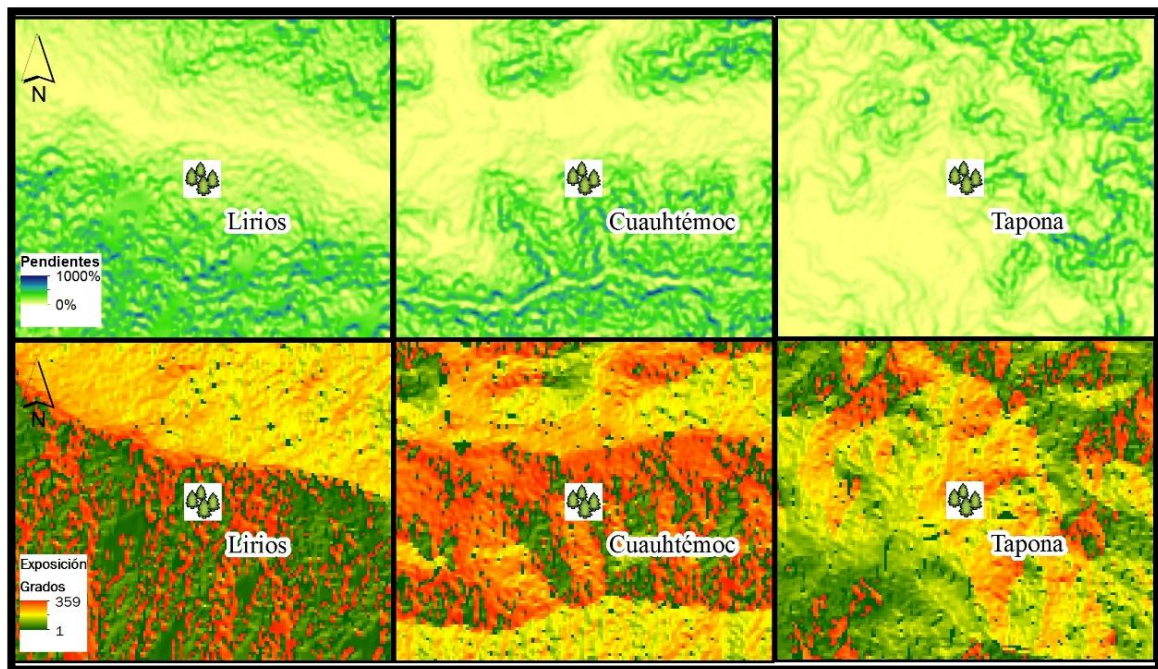


Figura 4. Grados de exposición en grados y pendiente en porcentaje para las poblaciones de *P. greggi* en estudio.

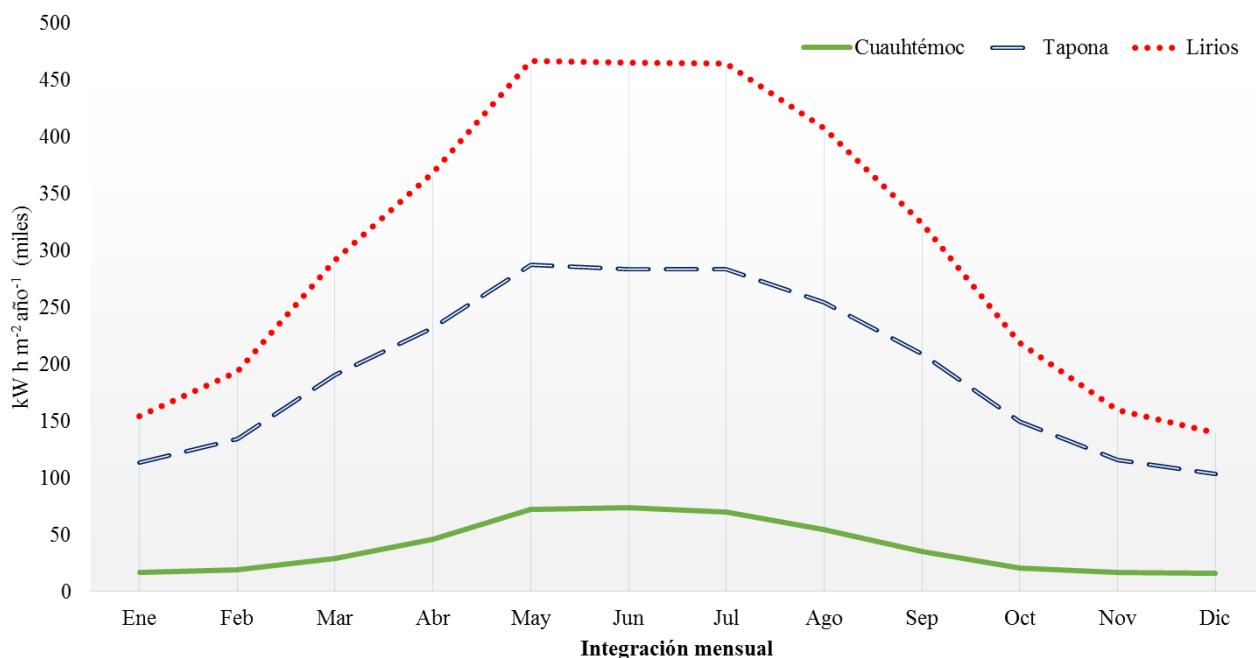


Figura 5. Radiación anual ($\text{kW h m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) para las poblaciones de *P. greggi* en estudio.

Obtención de parámetros fisiológicos y morfológicos

Se seleccionaron diez árboles de cada población con base en las condiciones de exposición, parentesco, dominancia, co-dominancia, estado sanitario y la no bifurcación troncal; se colectaron cinco ramas por árbol de la región apical durante los meses de junio y julio de 2010 y agosto de 2011. Las muestras se procesaron por inyección de aire según el método de Cochard *et al.* (1992) y Sperry y Saliendra (1994) para construcción de curvas de vulnerabilidad xilemática, donde el porcentaje de pérdida de conductividad (PPC) se obtuvo a partir de la conductividad inicial y las subsiguientes (Ecuación 3):

$$PPC = 100(k_{max} - k_h)/k_{max}$$

(3)

Donde Kh_{max} es la conductividad inicial y K_h es la conductividad resultante de la inyección de aire. Se calculó además la conductividad hidráulica específica Kh_s ($\text{kg m}^{-2} \text{MPa}^{-1} \text{s}^{-1}$), dividiendo la conductividad máxima entre el área de conducción de la rama.

Las variables que permiten la comparación entre curvas son las resultantes del ajuste al modelo sigmoideal propuesto por Pammenter y Vander-Willigien (1998) (Ecuación 4):

$$PPC = \frac{100}{1 + e^{a(\Psi-b)}}$$

(4)

Donde a es la relación de cambio entre la presión aplicada (Ψ) y la pérdida en conductividad (PPC) y b es la presión a la cual se pierde el 50% de conductividad (Ψ_{50}).

Se realizaron además mediciones directas de edad a aproximadamente 1.20 m de altura utilizando un taladro de Pressler y mediciones de altura total mediante hipsómetros Haga.

Análisis estadístico

El análisis fue compuesto a partir de treinta y dos variables, de las cuales tres corresponden a características dasométricas, cuatro fisiológicas, cinco topológicas y las restantes veinte son derivadas de componentes meteorológicos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Variables analizadas para las tres poblaciones de *P. greggii* en estudio.

Factor	Variable	Clave
Dasometría	Altura	Alt
	Diámetro	Diarb
	Edad	Edad
Fisiología	Conductividad hidráulica máxima	Khmax
	Conductividad hidráulica específica	Kh _s
	Coefficiente a	a
	Coefficiente b (Ψ_{50})	b

Topología	Pendiente observada	SLO_OBS
	Pendiente inferida	SLOPE
	Exposición	ASPECT
	Radiación anual	kWhM2An
	Factor de insolación	F
Climatología	Temperatura máxima normal	Tmaxn
	Temperatura máxima media	Tmaxm
	Temperatura máxima diaria	Tmaxd
	Temperatura media anual	Tma
	Temperatura mínima normal	Tminn
	Temperatura mínima media	Tminm
	Temperatura mínima diaria	Tmin
	Precipitación media anual	Tmind
	Precipitación máxima media	Pma
	Precipitación máxima diaria	Pmaxm
	Cociente precipitación temperatura	Pmaxd
	Días libres de heladas	PT
	Diferencial entre temperaturas máximas y mínimas mensuales	No_Hel Tv
	Temperatura máxima del mes más cálido	Tmaxc
	Temperatura máxima del mes más frío	Tmaxf
	Años sin heladas	Ta
Periodo de crecimiento	G	
Índices	Índice Modificado de Productividad Forestal de Paterson	iCVP
	Productividad forestal potencial	PP

Debido a la gran cantidad de unidades de medida y diferentes escalas en las que se presentaron las variables de estudio, realizó una transformación para estandarización de datos, estableciendo como parámetros la varianza unitaria y media cero (Ramírez, 1972) (Ecuación 5) y así establecer un solo nivel de importancia para todas las variables (Pla, 1986).

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij}}{S_j}$$

(5)

Donde:

Z_{ij} = Nuevo valor estandarizado.

X_{ij} = Valor con que se representa la variable j en la observación i .

S_j = Desviación típica o estándar de los valores de la variable j .

Utilizando estas variables transformadas, se realizó una regresión utilizando el método Stepwise en el software SPSS 22® para retirar del análisis las variables auto correlacionadas, estableciendo una significancia del 0.05.

A continuación se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) utilizando el módulo PRINCOMP del software Statistical Analysis System 9.1® (SAS, 1996), buscando agrupar la mayor variabilidad en los primeros componentes a partir de los vectores propios resultantes. Una vez establecidos los pesos del ACP, se analizó la correlación entre las variables estandarizadas y el coeficiente b (Ψ_{50}) mediante el módulo CORR seleccionando únicamente las variables significativamente relacionadas a un $P < 0.05$. Otro análisis realizado fue el agrupamiento de patrones utilizando un PRINCOMP y la selección PATTERN.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables seleccionadas mediante regresión STEPWISE y la matriz de correlación (Cuadro 3) fueron: coeficiente b (Ψ_{50}), pendiente, exposición, Tmaxm, Tma, Pma, PT, No_hel, iCVP y radiación global utilizando un criterio de 0.05.

Cuadro 3. Matriz de correlación para las variables seleccionadas.

	b	SLOPE	ASPECT	Tmaxm	Tma	Tminm	Pma	PT	No_hel	iCVP	kWhM2An
b	1.0000	-0.5625	0.3537	0.0819	-0.0810	0.2385	-0.3441	-0.3044	0.5808	-0.4425	0.5610
SLOPE	-0.5625	1.0000	-0.8224	-0.4494	-0.1900	-0.6750	0.8108	0.7615	-0.8574	0.9200	-1.0000
ASPECT	0.3537	-0.8224	1.0000	0.8778	0.7148	0.9749	-0.9998	-0.9950	0.4123	-0.9796	0.8268
Tmaxm	0.0819	-0.4494	0.8778	1.0000	0.9624	0.9625	-0.8873	-0.9212	-0.0745	-0.7636	0.4564
Tma	-0.0810	-0.1900	0.7148	0.9624	1.0000	0.8527	-0.7288	-0.7810	-0.3424	-0.5596	0.1977
Tminm	0.2385	-0.6750	0.9749	0.9625	0.8527	1.0000	-0.9792	-0.9922	0.1989	-0.9102	0.6807
Pma	-0.3441	0.8108	-0.9998	-0.8873	-0.7288	-0.9792	1.0000	0.9968	-0.3938	0.9753	-0.8153
PT	-0.3044	0.7615	-0.9950	-0.9212	-0.7810	-0.9922	0.9968	1.0000	-0.3193	0.9546	-0.7666
No_hel	0.5808	-0.8574	0.4123	-0.0745	-0.3424	0.1989	-0.3938	-0.3193	1.0000	-0.5871	0.8533
iCVP	-0.4425	0.9200	-0.9796	-0.7636	-0.5596	-0.9102	0.9753	0.9546	-0.5871	1.0000	-0.9230
kWhM2An	0.5610	-1.0000	0.8268	0.4564	0.1977	0.6807	-0.8153	-0.7666	0.8533	-0.9230	1.0000

Los vectores propios resultantes del ACP resultantes indican que el 94.86% de la variabilidad es explicado por los dos primeros componentes principales, (cuadro 4).

Cuadro 4. Factores por componente para las variables bajo estudio.

Variable	1	2	3
Coeficiente b (Ψ_{50})	0.1516	-0.3660	0.9182
Pendiente (Slope)	-0.3080	0.3037	0.1720
Exposición	0.3547	0.0546	-0.0368
Temperatura máxima mensual	0.2976	0.3415	0.0870
Temperatura media anual	0.2335	0.4676	0.1479
Temperatura mínima mensual	0.3394	0.1898	0.0196
Precipitación media anual	-0.3540	-0.0670	0.0318
Cociente precipitación/temperatura	-0.3501	-0.1155	0.0118
Días libres de heladas	0.1724	-0.5358	-0.2421
Índice de Productividad de Paterson	-0.3532	0.0697	0.0861
Radiación anual	0.3094	-0.2995	-0.1705
Vector propio	7.8824	2.5519	0.5657
Varianza	0.7166	0.2320	0.0514
Varianza acumulada	0.7166	0.9486	1.0000

Se seleccionaron los efectos de las combinaciones dentro de los componentes 1 y 2 con base en la metodología gráfica de cambio de varianza (SAS, 1996), que analiza la acumulación de la varianza a lo largo de los componentes principales generados y determina la elección de componentes de acuerdo al cambio la pendiente (Figura 6).

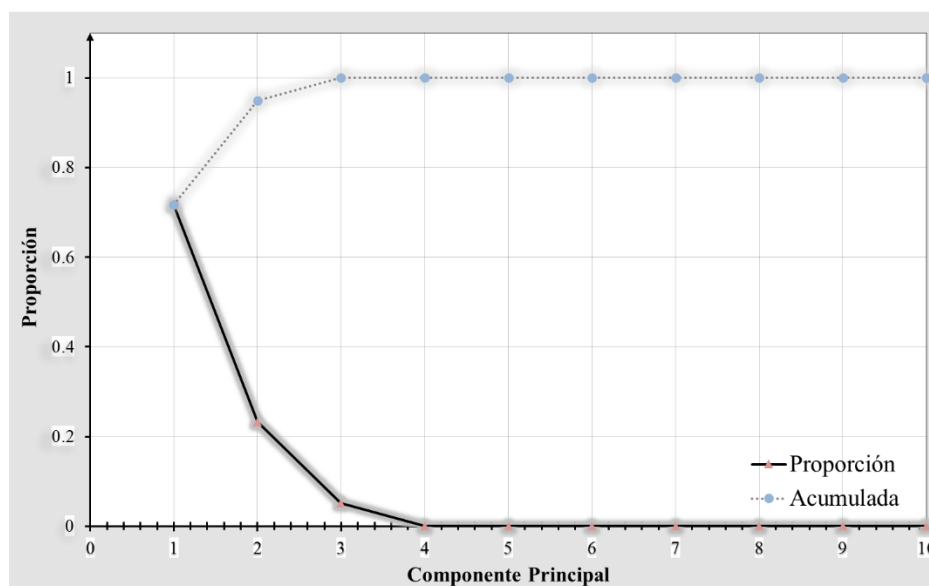


Figura 6. Porcentaje de la varianza explicada por componente principal desarrollado.

Una vez filtradas las varianzas componentes de trabajo, se analizó la relación de las comunidades con los componentes desarrollados, se observa que los componentes 1 y 2 dividen las poblaciones de *P. greggii* en tres grupos, dentro del Componente 1 ocurre una delimitación entre la comunidad La Tapona y un grupo conformado por las poblaciones Cuauthémoc y Los Lirios (Figura 7). La marcada separación entre las poblaciones indica que la mayoría de las características presentan alta variación geográfica. Los resultados para el Componente 1 se asemejan a los reportados por López-Locía y Valencia-Manzo (2001), que agrupan a las poblaciones Lirios y Cuauthémoc en una clase diferente y mayor en cuanto a densidad relativa de la madera que la población La Tapona. La separación poblacional individual producto de la combinación de los Componentes 1 y 2 confirma las diferencias encontradas por López-Upton y Donahue (1995) referentes a la producción inferior y de menor calidad de semilla en la población Los Lirios con respecto de la población La Tapona; otras diferencias son las sugeridas por las amplias distancias

genéticas entre Los Lirios y La Tapona reportadas por Parraguirre *et al.*, (2002). El bajo peso de la población Lirios dentro de ambos componentes coincide con lo encontrado por Hernández-Pérez *et al.*, (2001), que agrupa a esta población con las poblaciones de *Pinus greggii* var. *australis* por su alta tasa de crecimiento.

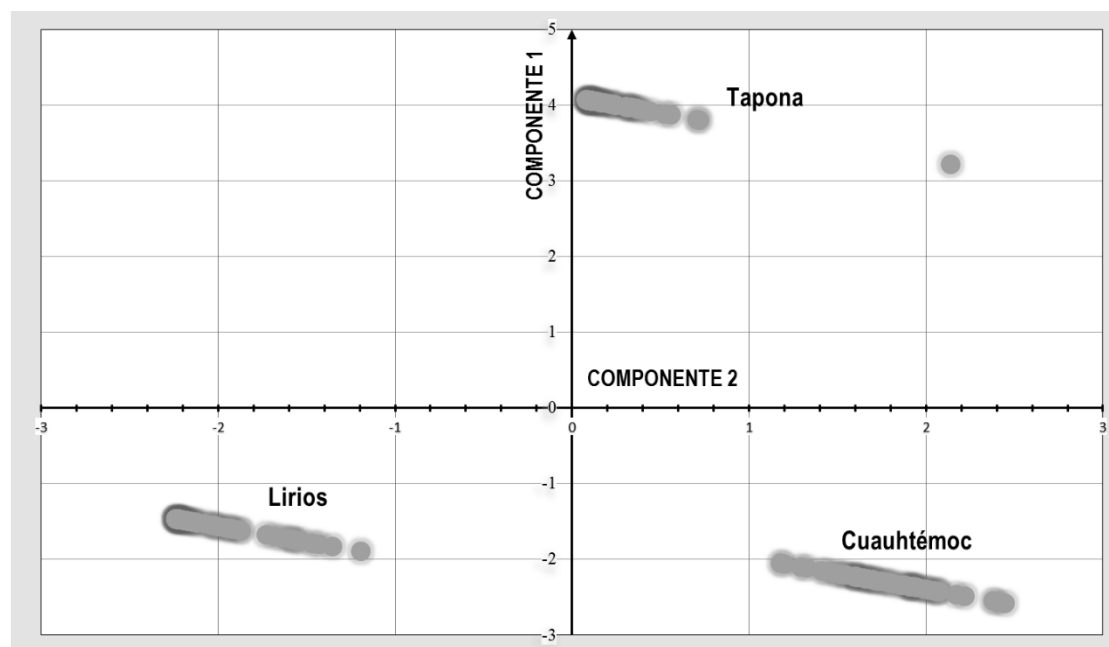


Figura 7. Componentes principales para variables climáticas y fisiológicas para las poblaciones naturales de *P. greggii* en estudio.

Los arreglos combinatorios entre los componentes principales generados y las variables bajo estudio, indican que existen relaciones no lineales entre los componentes, se destaca que las variables de temperatura y las relacionadas directamente con insolación, más altos valores del coeficiente b (Ψ_{50}) son representados por el Componente 1, mientras que en el Componente 2 se agrupan variables relativas con precipitación e índices integrales como iCVP y PT (Figura 8A). La pendiente (SLOPE) está opuesta directamente a la radiación global dentro del Componente 2 y diferente respecto a la exposición, esto es explicado porque comúnmente las poblaciones de *P. greggii* se encuentran ubicadas casi

exclusivamente en exposición norte, se minimiza así el efecto de la pendiente al integrar los doce meses de radiación solar (Hidalgo-González y Raventos-Bonvehi, 1993). Se conforman entonces dos grupos que presentan influencia positiva en la respuesta fisiológica, uno conformado por T_{ma} , T_{maxm} , T_{minm} y ASPECT, que se correlaciona estrechamente con una respuesta fisiológica mayor al estrés hídrico (Ψ_{50}), y esa respuesta también es provocada en menor medida, por un segundo grupo conformado por $kWhM2An$ y No_hel . En los componentes 2 y 3 se observa una relación lineal conformada por las temperaturas, variables topográficas y derivadas de precipitación, mientras el número de días sin heladas y la radiación global anualizada conforman un grupo con bajo impacto en la variabilidad de la muestra (Figura 8B). Por último, en la figura 8C se observa que la relación entre los componentes 1 y 3 deriva en dos grupos compactos, uno representado por variables relacionadas con la temperatura y radiación, muy separado del otro grupo compuesto por variables relacionadas a la precipitación y la pendiente.

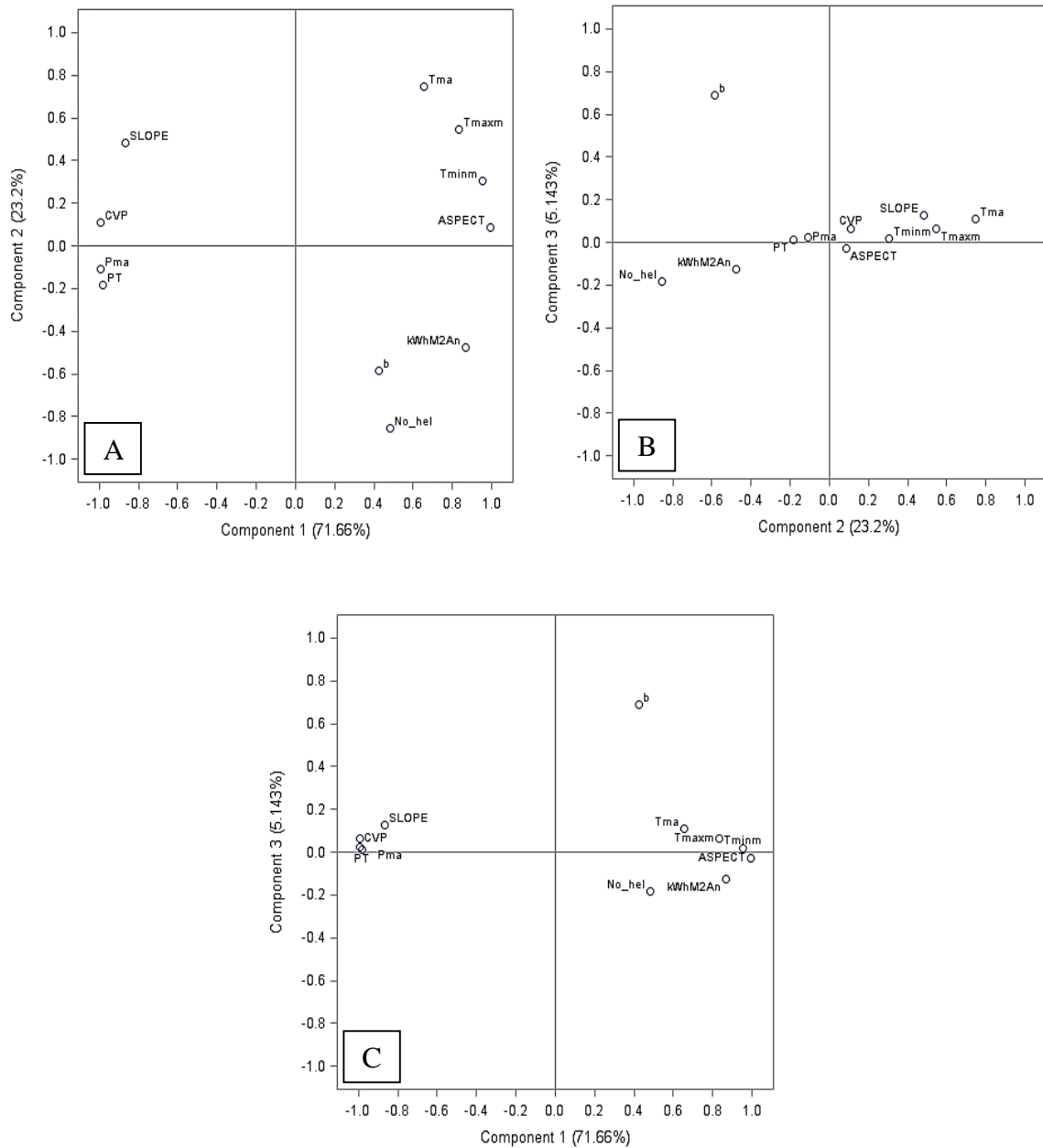


Figura 8. Patrones de distribución de variables climáticas y fisiológicas dentro de los Componentes 1 y 2 (A), 2 y 3 (B) y 1 y 3 (C) para tres poblaciones naturales de *P. greggii* en estudio.

Los pesos por componente por repetición son mostrados en la figura 9, donde la variabilidad asociada a cada población está muy bien delimitada, con observaciones atípicas por parte de la población La Tapona. Los resultados son coincidentes en los

encontrados para vulnerabilidad hídrica, que agrupó a las poblaciones Tapona y Lirios en una clase más baja de resistencia a la cavitación que la población Cuauthémoc.

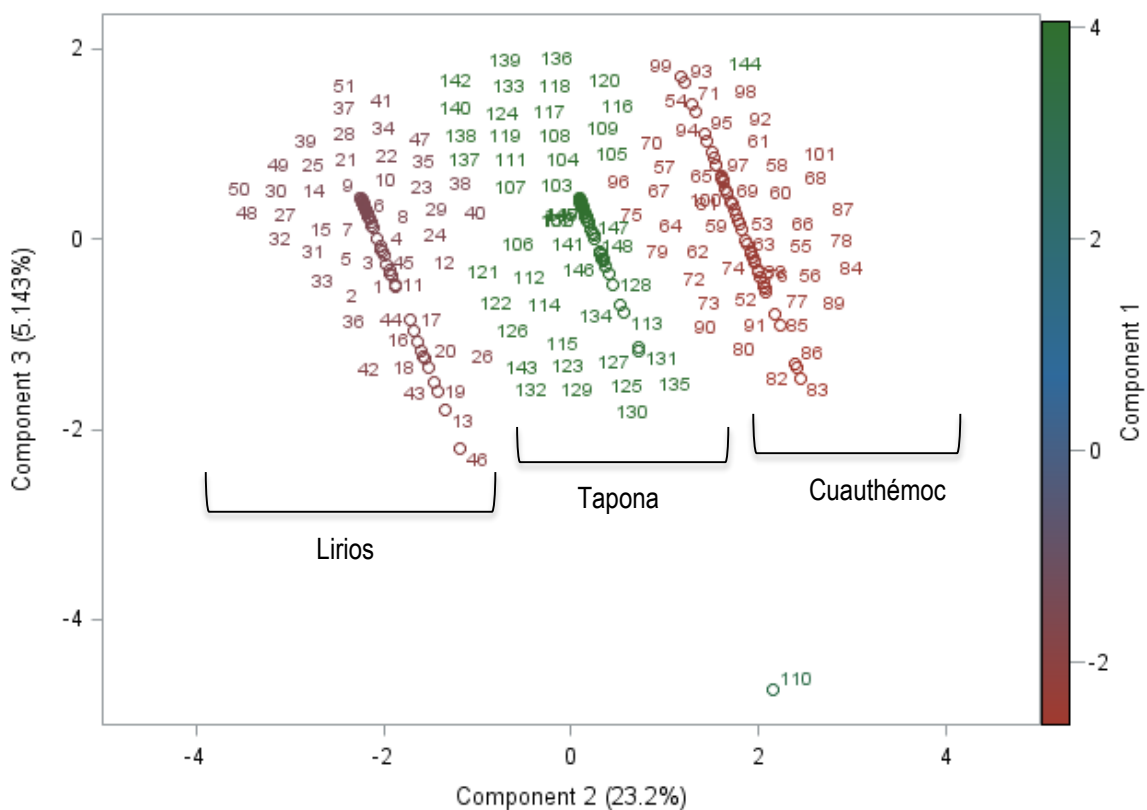


Figura 9. Comportamiento de los pesos de variables fisiológicas para un Análisis de Componentes Principales para tres poblaciones naturales de *P. greggii* en estudio.

Las variables estudiadas presentan diversos grados de correlación con la resistencia al estrés hídrico, representado por el coeficiente b (Ψ_{50}) (Figura 10). Esta resistencia a procesos de cavitación hídrica se asocia positivamente con la ausencia de extremos bajos en las temperaturas medias mensuales y normales; estos extremos mínimos en la temperatura han sido relacionados con una disminución en la resistencia al embolismo en raíces en *Larrea tridentata*, señalándose como posible limitante de su distribución

geográfica actual (Martínez-Vilalta y Pockman, 2002; Sperry y Tyree, 1988) también encontraron que las bajas temperaturas resultan en una pérdida de agua por sublimación y evaporación cuando se interrumpe la columna de agua en el xilema, incrementando el embolismo hasta en un 84% cuando hay congelamiento, este punto concuerda con el alto coeficiente de correlación ($R^2=0.58$) que relaciona en forma positiva y proporcional al coeficiente b (Ψ_{50}) y a los días libres de heladas (No_hel).

Las variables que tienen su origen en la precipitación (Pmaxd, Pmaxn, iCVP, PT y Pma), se relacionan en forma inversamente proporcional a la resistencia a la cavitación representada por el coeficiente b ($P<0.05$), este resultado indica que la baja eficiencia en los mecanismos de control de embolismo xilemático es determinada por la disponibilidad del agua, este resultado es consistente con lo reportado para *P. greggi* por López y Muñoz (1991) y Hernández-Pérez *et al.* (2001), así como para otras especies (Joly *et al.*, 1989; Borghetti *et al.*, 1998).

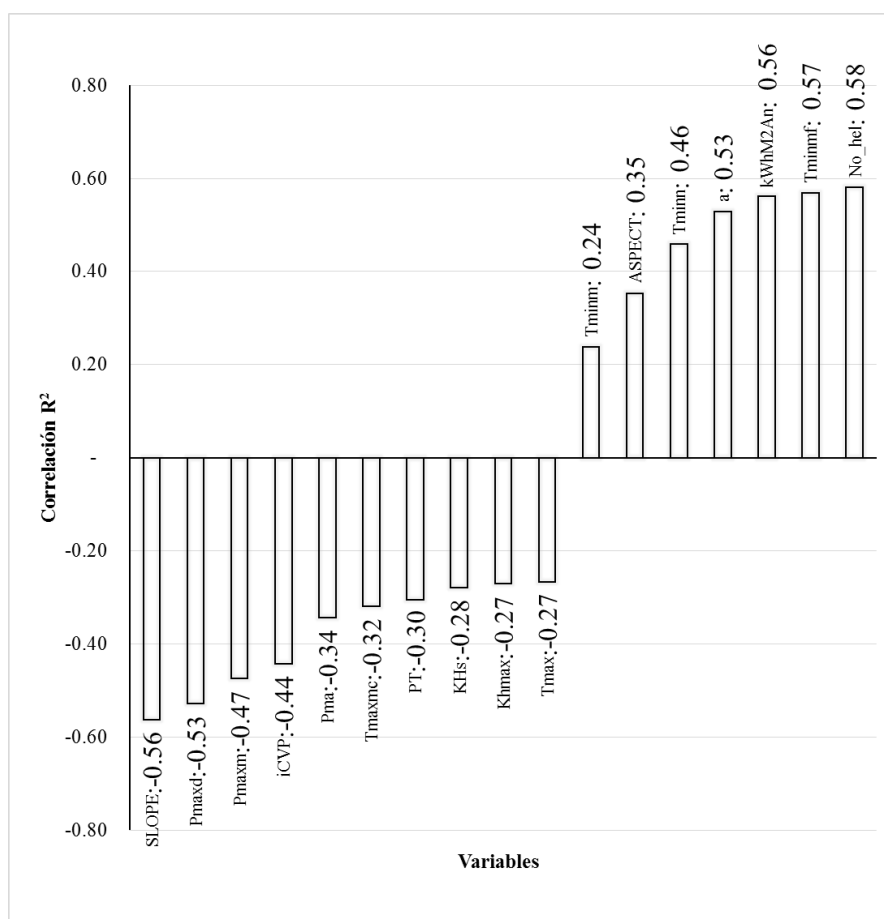


Figura 10. Coeficientes de correlación significativos a un $P < 0.05$ entre las variables estudiadas y el coeficiente b (Ψ_{50}) para tres poblaciones naturales de *P. greggii* en estudio.

CONCLUSIONES

Las poblaciones Cuauthémoc, Los Lirios y La Tapona, presentan condiciones diferentes en su climatología que provocan respuestas diferentes con respecto al estrés hídrico.

No se encontró relación entre las variables climáticas y dasométricas en las poblaciones estudiadas.

Los extremos mínimos en la temperatura y el número de días sin heladas por año, son determinantes en la fisiología de la resistencia estrés hídrico, disminuyendo la vulnerabilidad al embolismo xilemático.

Las variaciones en la climatología y topología analizadas confirman que la población Cuauthémoc presenta diferencias con las poblaciones Los Lirios y La Tapona, y que estas diferencias explican su mayor resistencia a la cavitación hídrica.

BIBLIOGRAFÍA

- Borghetti M, S Cinnirella, F Magnani (1998)** Impact of long-term drought on xylem embolism and growth in *Pinus halepensis* Mill. *Trees* 12:187-195.
- Céspedes-Flores S E, E Moreno-Sánchez (2010)** Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México. *Investigación Ambiental* 2(2):5-13.
- Cochard H (1992)** Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiology* 11:73-83.
- Conde C, F Estrada, B Martínez, O Sánchez, C Gay (2010)** Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24(1):125-140.
- Cornejo-Oviedo E H, R Vela-Moya, S Valencia-Manzo (2006)** Supervivencia y crecimiento de una prueba de progenie de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga, Coahuila. Libro Científico Anual Agricultura, Ganadería y Ciencia Forestal UAAAN-2006. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. pp: 186-191.

- Dvorak W S, J K Donahue (1993)** Reseña de investigaciones de la Cooperativa CAMCORE 1980-1992. Traducc. Meneses, J. Departamento Forestal, Universidad Estatal de Carolina del Norte. USA. 94 p.
- Gandullo J M, Serrada R (1977)** Mapa de productividad potencial forestal de la España peninsular. I.N.I.A., M.A.P.A. España.
- Gray L K, T Gylander, M S Mbogga, P Chen, A Hamann (2011)** Assisted migration to address climate change: recommendations for aspen reforestation in western Canada. *Ecological Application* 21(5):1591-1603.
- Hernández-Pérez C, JJ Vargas-Hernández, C Ramírez-Herrera, A Muñoz-Orozco (2001)** Variación geográfica en la respuesta a la sequía en plántulas de *Pinus greggii* Engelm. *Revista de Ciencia Forestal en México* 26(89): 60 p.
- Hidalgo-González J C, J Raventos-Bonvehi (1993)** Efecto de la exposición de ladera y pendiente en la evaluación de la demanda atmosférica potencial. Un ejemplo de cálculo en el semiárido aragonés (La Violada, Huesca). *Cuadernos I. Geográfica* 18-19:29-46.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias) (2011)** Red Nacional de Estaciones Estatales Agroclimatológicas. México. Sitio web consultado el 8 de enero de 2012:
<http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>
- Joly R B, W T Addams, S G Stafford (1989)** Phenological and morphological responses of mesic and dry site sources of coastal Douglas-fir to water deficit. *For Sci.* 35:987-1005.

- Karmalkar A V, R S Bradley, H F Díaz (2011)** Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. *Climate Dynamics* 37:605-629.
- Lemieux G J (1961)** An evaluation of Paterson's CVP Index in Eastern Canada. Roger Duhamel F.R.S.C. Canada. 11p.
- López-Locía M, S Valencia-Manzo (2001)** Variación de la densidad relative de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. *Madera y Bosques* 7(1):34-46.
- López-Upton J, J K Donahue (1995)** Seed production of *Pinus greggii* Engelm. in natural stands in Mexico. CAMCORE Cooperative North Carolina. Tree Planter's. USA. pp. 86-92.
- Martínez-Villalta J, W T Pockman (2002)** The vulnerability to freezing-induced xylem cavitation of *Larrea tridentate* (Zygophyllaceae) in the Chihuahuan desert. *American Journal of Botany* 89(12):1916-1924.
- Neilson R P, L F Pitelka, A M Solomon, R Nathan, G F Midgley, J M V Fragoso, H Lischke, K Thompson (2005)** Forecasting Regional to Global Plant Migration in Reponse to Climate Change. *BioScience* 55(9):749-759.
- Pammenter N W, C Vander-Willigien (1998)** A mathematical and statistical analysis of the curves illustrating vulnerability of xylem to cavitation. *Tree Physiology* 18:589-593.
- Parraguirre-Lezama C, J J Vargas-Hernández, P Ramírez-Vallejo, H S Azpiroz-Rivero, J Jasso-Mata (2002)** Estructura de la diversidad genética en poblaciones

naturales de *Pinus greggii* Engelm. Revista Fitotecnia Mexicana 25(003): 279-287.

Pla L E (1986) Análisis multivariado: Método de componentes principales. Departamento de Producción vegetal. Área de Ciencias del Agro y del Mar. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Coro, Falcón, Venezuela. 93 p.

Ramírez-Díaz L (1972) Aplicación de técnicas de ordenación: al análisis de componentes principales. Departamento de Ecología, Universidad de Sevilla. Sevilla, España. 30p.

S.A.S. (Statistical Analysis System) (1996) Multivariate Statistical Methods. Practical Applications. Course Notes. U.S.A. 639p.

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, M T Tyree (1988) Mechanism of Water Stress-Induced Xylem Embolism. Plant Physiology. 88:581-587.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed. R. K. Pachauri and L.A. Meyer. Switzerland. 151 pp.

UNIATMOS – UNAM (2011) Bases de datos, kml y metadatos. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Servidor WMS integrado del sitio web:

<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>

Valencia-Manzo S, V Serrano-Ordóñez, E H Cornejo-Oviedo, C Flores-López (2006)

Ensayo de cinco procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila. Libro Científico Anual Agricultura, Ganadería y Ciencia Forestal UAAAN-2006. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México. pp:182-185.

Vargas-Hernández J J, A Muñoz-Orozo (1988) Resistencia a sequía: Crecimiento y

supervivencia en plántulas de cuatro especies de *Pinus*. *Agrociencia* 72(2):197-208.

Villers-Ruíz L, I Trejo-Vázquez (2000) El Cambio Climático Y La Vegetación En

México: In: una visión hacia el siglo XXI. Gay-García C (comp). El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Autónoma de México. pp:57-59.

DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados de los parámetros de conductividad y resistencia al estrés hídrico, se mostraron diferenciales para las poblaciones en estudio, indicando que la población Cuauthémoc presenta una mayor resistencia al embolismo xilemático con respecto a las poblaciones Taponá y Lirios; fisiológicamente, esto puede ser explicado por las relaciones entre longitud del poro en las membranas de los vasos (Tyree y Sperry, 1989; Hargrave *et al.*, 1994),

Un punto discrepante entre los resultados presentados y la literatura revisada, es que *P. greggii*, que se distribuye en ecosistemas francamente séricos, presenta pendientes más pronunciadas en sus curvas de vulnerabilidad que 61 especies de coníferas (Martínez-Vilalta *et al.*, 2004 ; Delzon *et al.*, 2010); esto sugiere mecanismos de mitigación del fenómeno que podrían ser relacionados a ciclos largos de crecimiento y a un incremento rápido de altura (Salazar-García *et al.*, 1999), además de la regulación estomática, la porosidad difusa de la madera, distribución y tamaño de traqueidas, el aumento de biomasa parece ser el factor que brinda mayor resistencia antes de la cavitación y una vez establecida esta, la puede hacer reversible (Wang *et al.*, 2003; Dalla-Salda *et al.*, 2011). Otra de las posibles causas de esta discrepancia, es una sobre estimación de la vulnerabilidad intrínsecas al método de medición utilizado (Ennajeh *et al.*, 2011).

Como resultado del análisis de componentes principales, la climatología y topología analizadas para las poblaciones bajo estudio, resultan en tres grupos bien definidos dentro de dos componentes principales, separándose claramente las mediciones por población. Un primer componente, que agrupa el 71.66% de la varianza, se refiere a las variables de temperatura, exposición, radiación y días libres de heladas; el segundo componente, con el 23.2% de la varianza acumulada, se relaciona con las temperaturas, la pendiente y los coeficientes de productividad propuestos, relaciones proporcionales negativas pueden ser inferidas a partir de la combinación los segundo y tercer componentes principales, en el primer análisis conforman un grupo de baja influencia pero bien delimitado las variables pendiente, índice de productividad y precipitación, agrupándose en el otro extremo las temperaturas, exposición, radiación y días libres de heladas. Esta agrupación corresponde y explica las mediciones y diferencias encontradas en cuanto a vulnerabilidad al estrés hídrico, donde la población Cuauthémoc presenta mayor resistencia a cavitación y las poblaciones Lirios y Tapona presentan una mayor vulnerabilidad. Esta separación entre las poblaciones es señalada por varios autores: López y Valencia (2001), agrupan a las poblaciones Lirios y Cuauthémoc en una clase diferente y mayor en cuanto a densidad relativa de la madera que la población La Tapona; López y Donahue (1995) separan a las poblaciones Lirios y Tapona con respecto a su capacidad de producción de semilla en cantidad y calidad; Parraguirre *et al.*, (2002) encuentra amplias distancias genéticas entre Los Lirios y La Tapona.

Los valores de conductividad hidráulica máxima (kh_{max}), específica (kh_s) y el coeficiente b (Ψ_{50}) no presentan correlación significativa entre sí, pero existen correlaciones ($P < 0.05$) para las temperaturas bajas y la cavitación hídrica que confirman

los supuestos de Sperry *et al.*, (1988), que menciona que las temperaturas extremas bajas resultan en una pérdida de agua por sublimación y evaporación cuando se interrumpe la columna de agua en el xilema derivado del congelamiento. Por otro lado, las variables con origen en la precipitación se relacionan inversamente con la resistencia a la cavitación, lo cual es consistente con lo reportado *P. greggi* por López y Muñoz (1991) y Hernández-Pérez *et al.* (2001), así como para otras especies (Joly *et al.*, 1989; Borghetti *et al.*, 1998).

CONCLUSIONES GENERALES

La población Cuauthémoc presenta una resistencia mayor a la cavitación xilemática que las poblaciones Lirios y La Taponá.

Las diferencias encontradas en la respuesta al estrés hídrico están relacionadas con las variables climatológicas derivadas de temperatura y precipitación principalmente, con influencia de la radiación global anual y la exposición.

Los extremos mínimos en la temperatura y el número de días sin heladas por año, son determinantes en la fisiología de la resistencia al estrés hídrico, disminuyendo la vulnerabilidad al embolismo xilemático para las poblaciones en estudio.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- Borghetti M, S Cinnirella, F Magnani (1998)** Impact of long-term drought on xylem embolism and growth in *Pinus halepensis* Mill. *Trees* 12:187-195.
- Dalla-Salda G, A Martínez-Meier, H Cochard, P Rozenberg (2011)** Genetic variation of xylem hydraulic properties shows that wood density is involved in adaptation to drought in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)). *Annals of Forest Science* 68:747-757.
- Delzon S, C Douthe, A Sala, H Cochard (2010)** Mechanism of water-stress induced cavitation in conifers: bordered pit structure and function support the hypothesis of seal capillary-seeding. *Plant Cell and Environment* 33:2101-2111.
- Ennajeh M, F Simões, H Khemira, H Cochard (2011)** How reliable is the double-ended pressure sleeve technique for assessing xylem vulnerability to cavitation in woody angiosperms?. *Physiologia Plantarum* 142:205-210.
- Hargrave K R, K J Kolb, F W Ewers, S D Davis (1994)** Conduit diameter and drought-induced embolism in *Salvia mellifera* Greene (Labiatae). *New Phytologist* 126:695-705.
- Hernández-Pérez C, JJ Vargas-Hernández, C Ramírez-Herrera, A Muñoz-Orozco (2001)** Variación geográfica en la respuesta a la sequía en plántulas de *Pinus greggii* Engelm. *Revista de Ciencia Forestal en México* 26(89): 60 p.
- Joly R B, W T Addams, S G Stafford (1989)** Phenological and morphological responses of mesic and dry site sources of coastal Douglas-fir to water deficit. *For Sci.* 35:987-1005.
- López-Locía M, S Valencia-Manzo (2001)** Variación de la densidad relative de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. *Madera y Bosques* 7(1):34-46.

- López-Upton J, J K Donahue (1995)** Seed production of *Pinus greggii* Engelm. in natural stands in Mexico. CAMCORE Cooperative North Carolina. Tree Planter's. USA. pp. 86-92.
- Martínez-Villalta J, W T Pockman (2002)** The vulnerability to freezing-induced xylem cavitation of *Larrea tridentate* (Zygophyllaceae) in the Chihuahuan desert. American Journal of Botany 89(12):1916-1924.
- Parraguirre-Lezama C, J J Vargas-Hernández, P Ramírez-Vallejo, H S Azpiroz-Rivero, J Jasso-Mata (2002)** Estructura de la diversidad genética en poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. Revista Fitotecnia Mexicana 25(003): 279-287.
- Salazar-García J G, J J Vargas-Hernández, J Jasso-Mata, C Ramírez-Herrera, J López-Upton (1999)** Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. Madera y Bosques 5:19-34.
- Sperry J S, M T Tyree (1988)** Mechanism of Water Stress-Induced Xylem Embolism. Plant Physiology. 88:581-587.
- Wang T, S N Aitken, K Kacanagh (2003)** Selection for improved growth and wood quality in lodgepole pine: effects on phenology, hydraulic architecture and growth seedlings. Trees 17:269-277.

APÉNDICE

Programa 1. Selección de variables por el método STEPWISE.en SPSS.

REGRESSION

/MISSING LISTWISE

/STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA

/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)

/NOORIGIN

/DEPENDENT b

/METHOD=STEPWISE Khmax KHs a SLOPE ASPECT Tmax Tmaxm Tmaxd Tma
Tminn Tminm Tmind Pma Pmaxm Pmaxd PT No_hel Tv Tmaxmc Tminmf Ta iCVP PP
kWhM2An

Programa 2. Análisis de Componentes Principales (ACP) en SAS.

/*ACP*/

proc princomp data=CLIMAS n=10 out=ACP2 ;

title 'ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (VARIABLES
SELECCIONADAS)';

var b SLOPE ASPECT Tmaxm Tma Tminm Pma PT No_hel iCVP kWhM2An;

ods output eigenvalues=EVALUES;

run;

Programa 3. Obtención de patrones del ACP y prueba de correlaciones en SAS.

SYMBOL1 I = NONE V=PLUS C = BLACK;

SYMBOL2 I = NONE V=SQUARE C = BLUE;

SYMBOL3 I = NONE V=CIRCLE C = GREEN;

SYMBOL4 I = NONE V=STAR C = RED;

SYMBOL5 I = NONE V=TRIANGLE C = PURPLE;

PROC GPLOT DATA=ACP2;

PLOT prin1*prin2 = 1;

proc GPLOT data=ACP2;

plot prin1*prin2=b;

plot prin1*prin2=SLOPE;

plot prin1*prin2=ASPECT;

plot prin1*prin2=Tmaxm;

plot prin1*prin2=Tma;

plot prin1*prin2=Tminm;

plot prin1*prin2=Pma;

plot prin1*prin2=PT;

plot prin1*prin2=No_hel;

plot prin1*prin2=iCVP;

plot prin1*prin2=kWhM2An;

plot prin1*prin2=pobl;

run;

```
proc princomp data=CLIMAS n=5 plots (ncomp=4)=pattern;

id pobl;

var b SLOPE ASPECT Tmaxm Tma Tminm Pma PT No_hel iCVP kWhM2An;

title 'PCA Pattern';

run;

ods graphics on;

proc corr data=CLIMAS nomiss plots=matrix(histogram);

    var b Khmax KHS a SLOPE ASPECT Tmax Tmaxm Tmaxd Tma Tminn Tminm

Tmind Pma Pmaxm

Pmaxd PT No_hel Tmaxmc Tminmf iCVP PP kWhM2An;

run;

ods graphics off;
```
