



Evaluación del potencial dendroclimático de *Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald

Martha González Elizondo^{1*}

María del Socorro González Elizondo¹

José Villanueva Díaz²

Julián Cerano Paredes²

¹ CIIDIR-Durango, Instituto Politécnico Nacional. México.

² CENID RASPA, INIFAP. México.

*Autor por correspondencia, email: martha_gonzel@yahoo.com.mx



Resumen:

Pinus lumholtzii se distribuye ampliamente en la Sierra Madre Occidental, en sitios con afloramiento de roca, por lo que sus anillos de crecimiento podrían ser sensibles a variables climáticas. Con el fin de evaluar su potencial dendroclimático se construyeron cuatro cronologías de anillo total, de entre 113 y 216 años, de poblaciones del sur del estado de Durango. Se estimó su correlación con cronologías de la misma región de *Pseudotsuga menziesii*. Se determinó su correlación con la precipitación, y se realizó una comparación entre los parámetros dendrocronológicos de ambos *taxa* y de las reconstrucciones climáticas que se obtuvieron. Las cronologías de *P. lumholtzii* tuvieron buen potencial dendroclimático, ya que presentaron adecuada sincronización en crecimientos (cofechado), y parámetros estadísticos relacionados con la sensibilidad a factores ambientales menos favorables, pero equiparables con los de *Pseudotsuga menziesii*. Las cronologías de *P. lumholtzii* registraron correlaciones altas y significativas entre sí y con las de *P. menziesii*, lo que indica respuesta del crecimiento radial anual a factores ambientales de influencia regional; la correlación entre los índices de crecimiento del pino y la precipitación regional fue estadísticamente significativa e incluso superior a la de *P. menziesii*; la reconstrucción de lluvia con los índices de crecimiento de *P. lumholtzii* se correlacionaron significativamente con la reconstrucción de lluvia lograda para el mismo período con los de *P. menziesii*. La amplia distribución de *P. lumholtzii* en la Sierra Madre Occidental, aunado al potencial dendroclimático determinado, hace posible establecer una red de cronologías para el monitoreo del cambio climático regional.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, dendrocronología, pino triste, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, reconstrucción climática, Sierra Madre Occidental.

Fecha de recepción/ Reception date: 25 de abril de 2017.

Fecha de aceptación/ Acceptance date: 30 de mayo de 2017.

Introducción

Una de las principales limitantes para el estudio de la variabilidad del clima y de los cambios que están ocurriendo en el mismo es la escasez de registros climáticos instrumentales. Incluso en los países desarrollados, los registros climáticos confiables no se remontan a más de 100 años (Easterling *et al.*, 1999). En México, existen amplias zonas geográficas sin datos meteorológicos y son muy pocas las estaciones con registros previos a 1940 (Florescano y Swam, 1995).

Una alternativa que subsana, parcialmente, esta deficiencia, la constituyen los registros climáticos naturales o “proxys” climáticos, tales como: capas de hielo, sedimentos marinos, polen y anillos de crecimiento de árboles. Estos últimos destacan por su mayor resolución temporal (de orden anual e incluso estacional). Mediante técnicas dendrocronológicas es posible reconstruir variables climáticas tanto de períodos anteriores a los registros climáticos disponibles, como también de zonas geográficas en las que no existen datos previos (Villanueva *et al.* 2000). Las principales especies usadas en Dendrocronología corresponden a géneros de pináceas (*Pinus*, *Pseudotsuga*, *Abies*, *Picea*, etcétera); la enorme riqueza de taxa de esta familia existentes en México contrasta con los escasos estudios dendroclimáticos que se han realizado en el país (Villanueva *et al.* 2000; Acosta-Hernández *et. al.*, 2017).

La detección de especies con potencial dendroclimático permite la reconstrucción de factores climáticos del pasado, lo cual constituye una base para el estudio de la variabilidad del clima y para el discernimiento entre las variaciones naturales y los cambios en el clima relacionados con actividades humanas, así como para la predicción de cambio climático en el futuro (Fritts, 1976).

Por otra parte, el bosque templado, principal tipo de vegetación en el que se presentan las pináceas, es el más susceptible de desaparecer en México, ante un escenario de cambio climático (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1997, 1998).

Dado el aprovechamiento selectivo de especies que se practica en estos bosques, las áreas naturales sin disturbio que podrían utilizarse para el monitoreo de cambios son raras, y, generalmente, poco accesibles (Lammertink *et al.*, 1996). Sin embargo, el estudio de algunas taxa como *Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald podría constituir una buena alternativa para los estudios dendroclimáticos. Este pino, conocido comúnmente como "pino triste" por su fisonomía característica, es cuasi endémica de la Sierra Madre Occidental, en donde ocupa sitios de suelo pobre y no tiene valor comercial (García y González, 1998).

Así, es de suponer que sus poblaciones estén menos alteradas por el impacto humano, en comparación con las especies de importancia económica. Además, debido al suelo pobre sobre el que comúnmente se desarrolla, el pino triste podría presentar mayor sensibilidad a factores ambientales como temperatura y precipitación. Debido a lo anterior, se considera que los estudios de los anillos de crecimiento con *P. lumholtzii* reflejarían mejor la relación con los factores naturales que los estudios con especies de importancia económica, en las que sus relaciones con los factores ambientales pudieran estar enmascaradas por el efecto del manejo forestal, incendios, así como por plagas y enfermedades, entre otros.

P. lumholtzii se ha utilizado en escasos estudios dendrocronológicos; González-Elizondo (2003) sugiere su posible potencial para registrar variaciones climáticas tanto de orden regional como local determinar que las cronologías del límite inferior de distribución eran más sensibles a las sequías que las del límite superior. Bickford *et al.* (2011) probaron la sensibilidad a la sequía del crecimiento radial de *P. engelmannii* Carrière y *P. lumholtzii* en un gradiente altitudinal en el Parque Nacional Basaseachi en Chihuahua, en un período de 60 años (1945-2004); González-Cásares *et al.* (2016) incluyeron una cronología corta (88 años) de pino triste, en una comparación de su potencial dendrocronológico con el de otras especies simpátricas de *Pinus* en el estado de Chihuahua; Irby *et al.* 2013 incluyen núcleos de crecimiento de *P. lumholtzii* para construir una cronología compuesta del Parque Nacional de Basaseachi; en este caso, se trata de una cronología de 225

años construida con base en muestras de tres especies: *P. durangensis* Martínez, *P. lumholtzii* y *P. engelmannii* colectadas en sitios climáticamente sensitivos.

Aunque *P. lumholtzii* ha sido objeto de diversas investigaciones dendrocronológicas, en ningún caso, se ha planteado la evaluación de su potencial contrastándolo con un taxon de probada utilidad dendrocronológica, como *P. menziesii* Douglas ex D. Don; por lo que, el objetivo del presente estudio fue evaluar el potencial dendroclimático de *P. lumholtzii* en el sur del estado de Durango, mediante el cumplimiento de las siguientes metas: 1) determinar el potencial de sincronización y fechado de sus anillos de crecimiento anual, 2) determinar su sensibilidad a factores ambientales, 3) determinar la asociación entre los índices de crecimiento radial anual del pino triste y diferentes factores climáticos, y 4) obtener modelos de regresión para reconstruir variables climáticas en función del crecimiento radial anual y comparar las reconstrucciones climáticas que se logren con aquéllas obtenidas mediante estudios similares con *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, en la misma región.

Se plantea la hipótesis de que debido al poco disturbio al que ha estado sujeta la especie, así como y por las condiciones morfológicas y edáficas del suelo donde se desarrolla, esta posee adecuado potencial dendrocronológico para reconstrucciones paleoclimáticas.

Materiales y Métodos

El trabajo de campo se realizó en la región sur del estado de Durango, la cual representa, en general, el área central de la distribución latitudinal de *P. lumholtzii* (Farjon, 2013). Se seleccionaron dos sitios adyacentes al camino de la ciudad de Durango al aserradero La Flor (LFA y LFB), y dos más sobre el camino de la cabecera municipal de El Mezquital al aserradero Los Charcos (MEA y MEB). Las poblaciones se ubican, respectivamente, en los límites altitudinales superior e inferior de la especie en cada transecto (Cuadro 1). La vegetación natural está

dominada por *P. lumholtzii*, que comúnmente forma bosques abiertos en sitios con fuerte afloramiento de roca madre, o con pedregosidad superficial y escaso suelo, por lo regular ácido (García y González, 1998). En cada sitio se obtuvieron, al menos, dos muestras (virutas) de 40 árboles de *P. lumholtzii* elegidas por el método cuadrantes centrados en un punto (Cottam y Curtis, 1956), de diferentes diámetros representativos de las poblaciones.

A partir de técnicas tradicionales en dendrocronología para la preparación de las muestras y procesamiento de la información (Swetnam *et al.*, 1985; Fritts y Swetnam, 1989) se construyeron cuatro cronologías de *P. lumholtzii*. El ancho total (madera temprana + madera tardía) de los anillos anuales, se midió con una precisión de 0.001 mm con un sistema de medición Velmex y *software Medir* (Krusic *et al.*, 1996). Para el análisis de la calidad de los datos (fechado y medición) y de las muestras (sensibilidad media y presencia de *outliers*) se utilizó el programa COFECHA (Holmes, 1996). Después de analizar los resultados del programa COFECHA, se descartaron algunas series con problemas de fechado, debido a crecimiento irregular, pudriciones o fraccionamiento de los núcleos de crecimiento, con el fin de incluir solo aquellas con mayor sensibilidad y respuesta climática común.

Una vez verificada la calidad del fechado y de la medición, se procedió a usar el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1996), el cual genera cronologías normalizadas. Dicho programa estandariza cada serie individual y remueve la varianza debida a factores biológicos, como la edad y el crecimiento radial, así como la varianza por la productividad diferente entre micrositios y cambios en el ambiente de los árboles no relacionados con el clima (Fritts, 1976; Cook *et al.*, 1991). El programa ARSTAN maximiza la varianza debida a factores ambientales que afectan a la población en conjunto (e.g. factores climáticos y atmosféricos).

Para remover la influencia de los procesos fisiológicos relacionados con la edad, y al mismo tiempo conservar las variaciones de baja frecuencia relacionadas, posiblemente, con tendencias climáticas, se eligió como primera estandarización

ajustar una curva exponencial negativa o línea recta con pendiente positiva o negativa; posteriormente, una segunda estandarización al fijar una línea flexible que preservara 50 % de la varianza a una longitud de onda de 128 años, procedimiento conservador que remueve solamente las tendencias monotónicas (Cook y Peters, 1981). Enseguida se obtuvo, para cada serie individual, un índice de crecimiento por año, al dividir el valor real de ancho del anillo entre el valor correspondiente en la curva; de esta manera, si el crecimiento real es igual o excede el valor estimado, el índice generado será un valor igual o mayor a la unidad. Por último, se promediaron los índices anuales de las series individuales para producir la cronología correspondiente.

Para determinar la potencialidad dendroclimática relativa de las cronologías de pino triste, las estadísticas descriptivas obtenidas para las cronologías de cada uno de los cuatro sitios se compararon entre sí; así como, las cronologías obtenidas previamente para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la región (Stahle y Cleaveland, 1993; González-Elizondo, 2003). La respuesta de las cronologías al clima, se refleja, principalmente, en sus valores de sensibilidad media, desviación estándar, autocorrelación y relación signo-ruido (Fritts, 1976; Speer, 2010). Se considera que una cronología tiene buen potencial dendroclimático, si cuenta con las siguientes características: fuerte variación de alta frecuencia (alta sensibilidad media), desviación estándar alta, baja autocorrelación de primer orden y alta correlación entre series (Villanueva, 1995).

Se analizó la correlación entre las cuatro cronologías y entre los índices de crecimiento de cada una de ellas y los factores climáticos (precipitación). Mediante modelos de regresión se reconstruyó la precipitación promedio regional de noviembre a agosto para el periodo 1787-2001.

Cuadro 1. Ubicación geográfica de las cuatro poblaciones de *Pinus lumholtzii* B.L.Rob. & Fernald estudiadas en el sur de Durango.

Clave	Localidad	Coordenadas	Altitud (msnm)
LFB	Camino Durango-La Flor	23°42'16" N, 104°44'20" O	2 430
LFA	Camino Durango-La Flor	23°37'41" N, 104°44'00" O	2 700
MEB	Camino El Mezquital-Charcos	23°22'42" N, 104°20'30" O	2 400
MEA	Camino El Mezquital-Charcos	23°16'53" y 104°20'46" O	2 630

LFB = Aserradero La Flor B; LFA = Aserradero La Flor A; MEB = Aserradero Mezquital Charcos B; MEA = Aserradero Mezquital Charcos A.

Análisis de la asociación entre los índices de crecimiento y el clima

La asociación entre la variabilidad del clima y la variabilidad en el crecimiento radial de *P. lumholtzii* en el área de estudio, se determinó a partir de los datos de precipitación de cuatro estaciones meteorológicas de la región, con más de 30 años de registros climatológicos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio con más de 30 años de registros climáticos.

Nombre	Período	Lat. N.	Long. O.	Elevación (m)	Clima¹
Las Bayas	1964-2001	23°30'	104°49'	1 840	C(E)(w2)
El Salto	1940-2001	23°47'	105°22'	2 560	C(E)(w2)
Navíos	1964-1999	23°54'	105°03'	2 492	C(E)(w2)
Otinapa	1963-1999	24°03'	104°59'	2 400	C(E)(w1)

El factor climático y el periodo del año más importante para el crecimiento anual de *P. lumholtzii* en el área de estudio, se identificó con base en el valor r (producto momento de Pearson) y su probabilidad de que $r = 0$, entre los índices de crecimiento anual de las cronologías de la región y los datos mensuales y estacionales de precipitación total, temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima.

Dado que el crecimiento anual de los árboles es afectado por las condiciones climáticas tanto de la estación de crecimiento, como por las condiciones prevalecientes en los meses anteriores a ella, para los análisis de correlación, se consideraron 18 meses: los 12 meses del año actual de crecimiento y los meses previos al año de crecimiento (julio del año anterior a diciembre del año de crecimiento). Los datos de los meses individuales que se correlacionaron significativamente con el crecimiento, se combinaron (promedios en el caso de temperaturas y las sumas en el caso de precipitación) para obtener los datos climáticos mensuales y estacionales, los cuales, a su vez, se correlacionaron con los índices de crecimiento.

Para explorar la asociación entre los índices de crecimiento y los factores climáticos, se seleccionó el período de 1965 a 2001, ya que corresponde al período común de inicio de los registros meteorológicos en las diferentes estaciones.

Debido a lo reducido del período que cuenta con registros climáticos confiables, se descartó el proceso de verificación, que resulta deseable en este tipo de estudios. Para esto, se requeriría dividir la serie de datos climáticos en dos partes, lo cual resultaría en detrimento del número de observaciones para construir los modelos de predicción (Briffa *et al.*, 1990). En su lugar, de manera exploratoria, se obtuvieron los coeficientes de correlación para diferentes períodos con el fin de tener una idea de la estabilidad de la asociación entre el crecimiento y el clima. Asimismo, con el fin de tener resultados comparables con los de estudios previos utilizando *Pseudotsuga menziesii* (Stahle y Cleaveland, 1993; Cleaveland *et al.*, 2003), también se analizó la correlación crecimiento-clima para el período 1965-1993 usada en dichos estudios.

Con base en los resultados anteriores, se construyeron modelos de regresión lineal para reconstruir la precipitación regional en función de los índices de crecimiento.

Resultados y Discusión

Potencial de sincronización y fechado

El método de fechado de representaciones gráficas o *skeleton plots* (Stokes y Smiley, 1968) resultó de difícil aplicación en este estudio, debido a la gran cantidad de anillos falsos y perdidos detectados en las muestras de *P. lumholtzii*. Por lo tanto, para fechar los anillos de crecimiento de las muestras, se recurrió, de manera alternativa, al método visual de sincronización y se tomó como referencia anillos indicadores con el apoyo de cronologías de *P. menziesii* de la región, desarrolladas previamente (Stahle y Cleaveland, 1993; González-Elizondo, 2003). Lo anterior es

común, y permite un rápido fechado cuando se tienen cronologías previas de la misma o de diferentes especies para la región.

La dificultad de sincronización, o fechado cruzado, es común en dendrocronología. Problemas similares se han detectado al estudiar otras taxa de pino en México, como *Pinus lagunae* (Passini) Passini, *P. cembroides* Zucc., *P. edulis* Engelm. (Díaz-Castro *et al.*, 2001), y *P. pinceana* Gordon (Santillán-Hernández *et al.*, 2010); así como *P. hartwegii* Lindl. (Villanueva *et al.*, 2015), *Juniperus monticola* Martínez (Villanueva-Díaz *et al.*, 2016), *Taxodium mucronatum* Ten. (Stahle *et al.*, 2011), *Prosopis* spp. (Villalba *et al.*, 2000), entre otras.

De un total de 415 muestras procesadas, se logró sincronizar y fechar 258 (62 %). Esta proporción es menor en las clases de mayor edad, lo cual indica que existe más dificultad para sincronizar y fechar las muestras provenientes de árboles viejos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Muestras obtenidas, revisadas y fechadas por clases de edad y proporción de muestras fechadas con relación a las obtenidas y a las revisadas.

	Revisadas (#)	Fechadas (#)	%
Total de muestras	415	258	62
Mayores de 50 años	312	165	53
Mayores de 100 años	180	74	41
Mayores de 150 años	81	36	44
Mayores de 200 años	29	9	31

El porcentaje de muestras sincronizadas y fechadas varía de 31 % (mayores de 200 años) a 62 % (de todas las edades). Cifras que son equiparables, e incluso

superiores, a las citadas por Díaz-Castro *et al.* (2001) para *Pinus lagunae*, quienes señalan que solamente 25 % de sus muestras fueron datadas.

Características de las cronologías obtenidas

Se obtuvieron cuatro cronologías para *P. lumholtzii* del sur de Durango. Se colectó un total de 50 muestras superiores de 200 años (11 con más de 250 años). Sin embargo, el individuo más viejo fechado con precisión y considerado para la construcción de las cronologías fue de 216 años, colectado en el sitio LFA, en donde se localizó 50 % de los árboles con edad superior a 200 años. Las cronologías de los dos sitios de mayor altitud (LFA y MEA) tienen una longitud media mayor que los sitios del límite inferior de distribución (LFB y MEB).

En comparación con las cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (González-Elizondo, 2003), especie reconocida como de excelente potencial dendrocronológico, las cuatro cronologías de *P. lumholtzii* revelan una sensibilidad media aceptable (0.247-0.379); una intercorrelación relativamente baja (0.538 – 0.666); y presentan una mayor proporción de segmentos poco correlacionados con la cronología maestra (Cuadro 4).

Las cuatro cronologías son superiores a 100 años, con un período común entre ellas que se extiende de 1890 a 2001. La cronología más extensa es la del sitio LFA (1787-2002) y la más corta del sitio MEB (1890-2002). La extensión de las cronologías resulta corta, si se compara con las de *Pseudotsuga* (Cleaveland *et al.*, 2003) y de *Taxodium mucronatum* (Stahle *et al.*, 2012); no obstante, se equipara con la registrada para pino triste por Bickford *et al.* (2011) y supera la edad indicada para *Pinus cooperi* C.E.Blanco (Cerano *et al.*, 2012), *P. pinceana* (Santillán-Hernández *et al.*, 2010) y *Pinus lagunae* (Díaz-Castro *et al.*, 2001); así como la documentada para *P. lumholtzii* por González-Cásares *et al.* (2016). Adicionalmente, dado que la mayoría de los bosques antiguos han desaparecido de

la región, como consecuencia de las extracciones forestales (Lammertink *et al.*, 1996); los árboles de más de 250 años de *P. lumholtzii* constituyen una excelente alternativa para extender reconstrucciones dendroclimáticas, al menos de los últimos dos siglos.

Análisis del potencial dendroclimático de las cronologías obtenidas

Un análisis comparativo de los datos según la prueba de calidad del programa COFECHA, entre *P. lumholtzii* y *P. menziessii*, indica una alta cantidad de segmentos que pudieran señalar posibles errores de fechado en dos de las cronologías de pino triste, aunque, de hecho, fueron problemas de crecimiento en ciertas series de pino triste, lo cual también se refleja en la menor intercorrelación entre las series individuales que las componen, con repercusiones en la sensibilidad media de las mismas.

Análisis de la sensibilidad a factores ambientales de las cronologías

Con base en los parámetros estadísticos que reflejan respuesta a factores ambientales (sensibilidad media, autocorrelación, desviación estándar, relación signo-ruido), la cronología MEB muestra el mejor potencial dendroclimático seguida por la cronología LFA. Según los mismos parámetros, la LFB sería la de menor potencial (Cuadro 4).

Cuadro 4. Resumen comparativo de las estadísticas descriptivas de las cuatro cronologías de *Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald desarrolladas para el sur de Durango.

Parámetros estadísticos	MEA	MEB	LFA	LFB
Sensibilidad media	0.2163	0.3049	0.2479	0.1627
Autocorrelación primer orden	0.1366	0.1871	0.0553	0.3338
Correlación entre muestras	0.396	0.448	0.302	0.286
Relación Señal- Ruido	7.693	22.76	9.445	8.329
Varianza en el primer eigenvector (%)	45.40	48.75	34.93	33.57
Desviación estándar del intervalo común	0.192	0.286	0.201	0.189
Período	1811-2002	1890-2002	1787-2002	1830-2001
Número de años/árboles/muestras	192/33/39	113/38/39	216/42/48	172/35/39
Período común	1910-1980	1970-2001	1920-1977	1922-1998
Número de años/árboles/muestras	71/12/14	32/28/28	58/22/25	77/21/22

Cronologías de *P. lumholtzii* = MEA, MEB, LFA, LFB relacionadas en el Cuadro 1.

La cronología MEB tuvo los valores más altos de sensibilidad media, desviación estándar, correlación entre muestras, relación señal-ruido y proporción de varianza en el primer eigenvector. Todos estos parámetros se relacionan con un alto potencial dendroclimático. Sin embargo, una limitante de esa cronología es su corta extensión y su relativa alta autocorrelación, aunque en términos prácticos es similar al de las otras series, lo cual indica efecto retardado de condiciones ambientales, tanto favorables como desfavorables que afectan el crecimiento en el siguiente año. Lo anterior enmascara el efecto del clima del año de crecimiento; sin embargo, dicho valor es comparativamente menor a cronologías de otras especies, que en ocasiones presentan hasta dos años de autocorrelación; problema que se elimina en

la versión residual de la cronología, que involucra el uso de métodos autorregresivos y la generación de una media robusta (Cook *et al.* 1987).

Por el contrario, la cronología LFB se caracteriza por parámetros estadísticos que se relacionan con bajo potencial dendroclimático: valores más bajos de sensibilidad media, desviación estándar, correlación entre muestras, y proporción de varianza en el primer eigenvector. Su valor señal-ruido de esta cronología no parece diferir del registrado por las dos cronologías restantes: MEA y LFA. Estos valores indican una relativa mayor influencia de factores ambientales locales (no climáticos) sobre el crecimiento radial en los sitios de estudio, en comparación con el sitio MEB (con un valor de señal-ruido mucho mayor). El comportamiento de este parámetro; sin embargo, no es limitante para la obtención de información climática de ninguna de las cronologías, ya que el cociente fue positivo para todas ellas.

En suma, según los valores de los parámetros estadísticos relacionados con el potencial dendroclimático, las cronologías con más y con menor potencial, respectivamente, son MEB y LFB; mientras que los valores intermedios de las dos restantes: MEA y LFA parecen indicar potencial dendroclimático intermedio.

Por otra parte, el análisis comparativo de los valores de los parámetros estadísticos relacionados con potencial dendroclimático entre las cuatro cronologías de *P. lumholtzii* y las cinco de *P. menziesii* disponibles para la región, sugiere un buen potencial dendroclimático para *P. lumholtzii*. La cantidad de cronologías documentadas hasta la fecha del estudio, para los dos taxa considerados en la región (5 y 4 respectivamente), no permitió una comparación estadística de los valores de los parámetros en cuestión; sin embargo, su análisis visual sugiere: 1) los de sensibilidad media y de desviación estándar de las cronologías de *P. lumholtzii* son en términos generales menores que los de *P. menziesii*, aunque algunas cronologías de *P. lumholtzii* alcanzan los valores promedio registrados para *P. menziesii* de estos parámetros. Es decir, en general *P. lumholtzii* evidencia menor sensibilidad que *Pseudotsuga*; sin embargo, algunas cronologías de pino son tan sensibles como las cronologías promedio de *Pseudotsuga*. Y 2) Las cronologías de *P.*

lumholtzii alcanzan valores tan altos como los de *P. menziesii* en lo que se refiere a correlación entre muestras y entre árboles, relación señal-ruido y proporción de varianza explicada por el primer eigenvector. Lo anterior, significa, que en general, las cronologías de *P. lumholtzii* poseen una fuerte señal común, en consecuencia, un buen potencial para reconstrucciones climáticas.

Correlación entre cronologías

Respecto a la asociación entre cronologías, el análisis de correlación del período común 1890-2001 (112 años) entre las cuatro cronologías de pino triste y las cinco cronologías previas de *P. menziesii* (Cuadro 5), indica que todas se correlacionan de manera significativa; que coincide con lo registrado por González-Cásares *et al.* (2016) quienes determinaron que la cronología de *P. lumholtzii* se correlaciona significativamente con las de *Pinus arizonica* Engelm., *P. durangensis* Martínez, *P. engelmannii* Carrière y *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. para el período común de 1970 a 2015.

Cuadro 5. Correlación entre cronologías para el período común 1890-2001 ($p < 0.001$).

	MEA	MEB	LFA	LFB	BAY	BAN	TEU	SAL	BAR
MEA		0.71	0.82	0.59	0.79	0.70	0.67	0.49	0.52
MEB	0.71		0.65	0.53	0.59	0.57	0.75	0.38	0.49
LFA	0.82	0.65		0.77	0.78	0.71	0.72	0.54	0.55
LFB	0.59	0.53	0.77		0.51	0.57	0.66	0.49	0.54
BAY	0.79	0.59	0.78	0.51		0.68	0.55	0.48	0.45
BAN	0.70	0.57	0.71	0.57	0.68		0.72	0.29	0.67

TEU	0.67	0.75	0.72	0.66	0.55	0.72	0.33	0.63
SAL	0.49	0.38	0.54	0.49	0.48	0.29	0.33	0.28
BAR	0.52	0.49	0.55	0.54	0.45	0.67	0.63	0.28

Cronologías de *Pinus lumholtzii*: MEA, MEB, LFA y LFB; cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (BAY, BAN, TEU, SAL y BAR).

Las cronologías que mejor se correlacionan entre sí son las correspondientes a las dos poblaciones de *P. lumholtzii* del límite superior de distribución (LFA y MEA). También son las que muestran mayor correlación con el resto, tanto de pino como de abeto. La cronología menos correlacionada con el resto es la de *P. menziesii* proveniente de la región de El Salto (SAL). Cabe destacar que esta muestra coeficientes de correlación más bajos con el resto de las cronologías de *Pseudotsuga*, que con las de pino triste. La relativamente alta correlación entre cronologías sugiere respuestas similares a factores ambientales que afectan a nivel regional. Asimismo, permite la construcción de cronologías regionales o compuestas (combinación de dos o más cronologías de sitio) que podrían reflejar mejor la respuesta a factores ambientales de influencia regional.

Correlación con factores climáticos

Las correlaciones más altas entre los índices de crecimiento de cada una de las cuatro cronologías y la lluvia total de los meses individuales corresponden a los meses de noviembre del año previo a mayo del año actual de crecimiento. La lluvia del mes de agosto del año de crecimiento también presenta correlaciones altas y significativas con los índices de crecimiento de las cuatro cronologías (Figura 1).

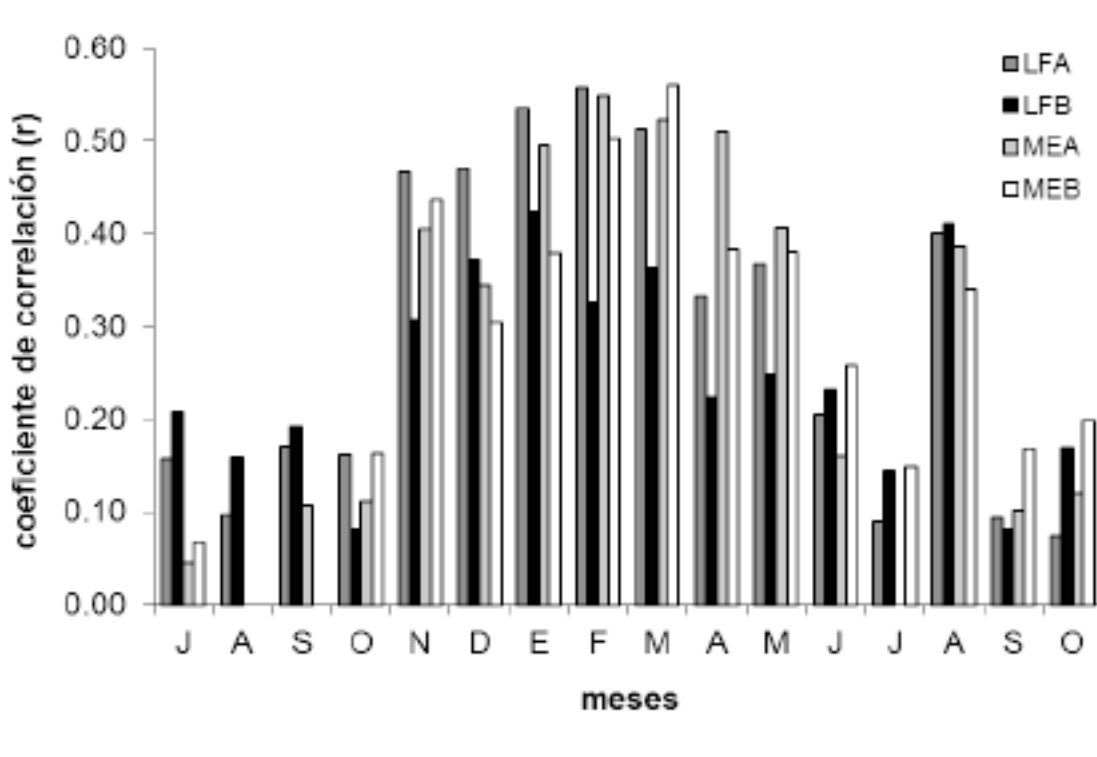


Figura 1. Correlación entre los índices de crecimiento de cada una de las cuatro cronologías de *Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald y la lluvia mensual regional (promedio de cuatro estaciones meteorológicas). El período continuo asociado de manera significativa ($p < 0.01$) con el crecimiento fue de noviembre del año anterior a mayo del año de crecimiento.

La lluvia total estacional de diferentes combinaciones de meses presenta correlaciones más altas que la de los meses individuales. Por ejemplo, mientras que el coeficiente de correlación más alto con la lluvia mensual tiene un valor de 0.56 (cronología MEA, mes de marzo), la precipitación total del período noviembre a mayo, así como la de noviembre a agosto tiene de correlación con los índices de crecimiento de *P. lumholtzii* hasta de 0.76 (período 1965-2001). Las cuatro cronologías siguen un mismo patrón de asociación con la precipitación; la precipitación de noviembre a octubre, de noviembre a agosto y de noviembre a mayo la que explica mejor el crecimiento (Cuadro 6).

Cuadro 6. Coeficientes de correlación (r) entre los índices de crecimiento anual de las cuatro cronologías de pino triste y la precipitación promedio regional de tres diferentes períodos¹.

Periodo	Años	MEB	LFA	LFB	MEA
Nov-Oct	1965-2001	0.66	0.67	0.58	0.62
	1965-1982	0.94	0.86	0.77	0.84
	1983-2001	0.49	0.54	0.49	0.45
	1965-1993	0.85	0.73	0.52	0.75
Nov-Ago	1965-2001	0.69	0.76	0.63	0.69
	1965-1982	0.87	0.91	0.76	0.85
	1983-2001	0.56	0.68	0.63	0.54
	1965-1993	0.82	0.8	0.59	0.77
Nov-May	1965-2001	0.65	0.76	0.55	0.71
	1965-1982	0.83	0.89	0.69	0.83
	1983-2001	0.58	0.76	0.59	0.68
	1965-1993	0.69	0.75	0.48	0.72

¹ = Los análisis de correlación se computaron considerando diferentes períodos de registros climáticos comprendidos entre 1965 y 2001.

Los resultados obtenidos en los sitios de estudio coinciden parcialmente con reportes previos para *Pseudotsuga* en la región (Stahle y Cleaveland, 1993; Cleaveland *et al.*, 2003; González-Elizondo, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2005); mientras el crecimiento anual de *Pseudotsuga* se asocia mejor con la precipitación de invierno-primavera, el crecimiento de *P. lumholtzii* parece estar determinado por

la lluvia de todo un año (noviembre de un año a octubre del siguiente). Cabe señalar, sin embargo, que este patrón es dinámico pues, como se aprecia en el Cuadro 6, la correlación crecimiento-clima varía en el tiempo. Esta diferencia resulta muy evidente al comparar los coeficientes de correlación entre los índices de crecimiento y el clima de los períodos 1965-1982 y 1983-2001 que parece indicar que el crecimiento radial de *P. lumholtzii* está mucho más determinado por la lluvia en el primer período que en el segundo. Adicionalmente, parece haber habido un cambio en la estación de lluvia que afecta más el crecimiento, ya que para el período 1983-2001 las correlaciones más altas con la precipitación se detectaron con períodos de lluvia diferentes de los mostrados en el Cuadro 6 (p. ej. enero-marzo y febrero-mayo). Esta circunstancia es de gran importancia para la reconstrucción climática mediante modelos de regresión, ya que la precipitación reconstruida coincidirá más, o menos con la real de acuerdo al período seleccionado para la construcción del modelo.

La correlación comparativa de los índices de crecimiento de cada una de las cuatro cronologías de pino triste con la precipitación coincide con los parámetros estadísticos de las mismas (Cuadro 4). La cronología mejor correlacionada con la precipitación resultó ser MEB, la cual también es la que tiene los mejores parámetros estadísticos relacionados con potencial dendroclimático. Mientras que, la cronología menos correlacionada con la precipitación fue LFB, que a su vez registra los valores de parámetros estadísticos más adversos.

Reconstrucción de la precipitación

Con el fin de obtener resultados comparables con estudios previos en la región, la precipitación se reconstruyó mediante modelos de regresión, a partir de los datos instrumentales de 1965 a 1993 de la precipitación promedio regional de noviembre del año anterior a la estación de crecimiento, a agosto del año de crecimiento.

La precipitación de noviembre a agosto explica hasta 68 % de la varianza en los índices de crecimiento tanto de *P. menziesii* (especie con potencial dendroclimático altamente reconocido), como en los de *P. lumholtzii*. (Cuadro 7). La asociación existente entre las reconstrucciones de la precipitación con ambas especies es notable, aunque existen dos períodos cortos de franca discrepancia, alrededor de 1790 y alrededor de 1840 (Figura 2).

Cuadro 7. Estadísticas de las regresiones entre diferentes cronologías y la precipitación promedio regional (1965-1993).

Cronología	r	r ²	Modelo ¹
BAY (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	0.82	0.68	$Y_i = 101.85 + (624.94)X_i$
LFA (<i>Pinus lumholtzii</i>)	0.80	0.63	$Y_i = -32.41 + (705.61) X_i$
MEB (<i>Pinus lumholtzii</i>)	0.82	0.68	$Y_i = 166.93 + (516.33) X_i$

¹ = Modelos para la reconstrucción de la precipitación regional (noviembre a agosto), en donde Y_i es el valor reconstruido para el año i , y X_i es el índice de crecimiento de la cronología para el año i .

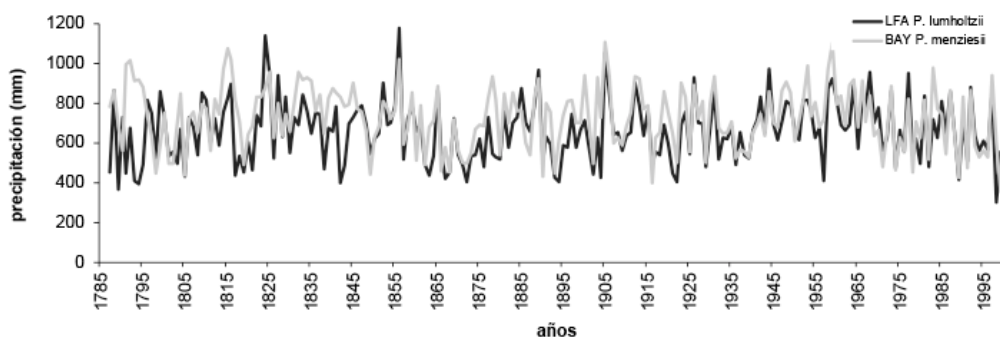


Figura 2. Precipitación promedio regional (1787-2001) reconstruida a partir de los índices de crecimiento de una cronología de *Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald (LFA) y de una de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (BAY).

Conclusiones

Los resultados de este estudio indican que *Pinus lumholtzii* tiene excelente potencial dendroclimático ya que: 1) fue posible fechar 40 % de las muestras colectadas, lo cual indica un buen potencial de sincronización y fechado (algunas referencias bibliográficas citan 25 % para especies consideradas con buen potencial); 2) las cronologías de *Pinus lumholtzii* presentan parámetros estadísticos relacionados con la sensibilidad a factores ambientales, si bien en general menos favorables que los de las cronologías de *Pseudotsuga menziesii*, si equiparables con los mismos; 3) las cronologías de *Pinus lumholtzii* tienen correlaciones altas y significativas entre sí, y las de *Pseudotsuga menziesii* de la región. Lo anterior es reflejo en el crecimiento de respuestas a factores ambientales de influencia regional; 4) la correlación entre los índices de crecimiento de *Pinus lumholtzii* y la precipitación regional fue estadísticamente significativa e incluso más alta que la mostrada por *Pseudotsuga menziesii*; y 5) la reconstrucción de lluvia lograda a partir de los índices de crecimiento de *Pinus lumholtzii*, se correlaciona significativamente con la reconstrucción de lluvia lograda para el mismo período con los índices de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii*.

Por lo tanto, la construcción de una red de cronologías de crecimiento a través de su área de distribución en la Sierra Madre Occidental sería de gran utilidad; tanto para el estudio del clima (variabilidad y cambio), como para el monitoreo de cambios en su distribución geográfica y en sus patrones de crecimiento que puedan estar relacionados con cambio climático.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto "Evaluación del potencial dendroclimático de *Pinus lumholtzii* Rob. & Fern. (CGPI: 20040673)". Se agradecen los comentarios y sugerencias de dos árbitros anónimos que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen ningún conflicto de intereses que limite la publicación de la contribución.

Contribución por autor

Martha González Elizondo: seleccionó los sitios de muestreo, obtuvo los núcleos de crecimiento, desarrollo de análisis e interpretación y redacción del artículo; María del Socorro González Elizondo: selección de los sitios, descripción de la vegetación y ayudó en la toma de muestras y trabajo de campo en general; José Villanueva Díaz: análisis de resultados y redacción del documento; Julián Cerano Paredes: preparación de muestras, datado de los núcleos de crecimiento y medición para la generación de series de tiempo.

Referencias

Acosta-Hernández, A. C., M. Pompa-García and J. J. Camarero. 2017. An updated review of dendrochronological investigations in Mexico, a megadiverse country with a high potential for tree-ring sciences. *Forests*, 8, 160; doi:10.3390/f8050160.

- Bickford, I. N., P. Z. Fulé, and T. E. Kolb. 2011. Growth sensitivity to drought of co-occurring *Pinus* spp. along an elevation gradient in northern Mexico. *Western North American Naturalist* 7(13): 338-348.
- Briffa, K. R., T. S. Bartholin, D. Eckstein, P. D. Jones, W. Karlen, F. H. Schweingruber and P. Zetterberg. 1990. A 1400-year tree ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature* 346: 343-9.
- Cerano P., J., M. Rivera G., J. Estrada Á., R. Trucíos C. y J. C. Ríos S. 2012. Análisis dendrocronológico de *Pinus cooperi* en Durango, México. *Agrofaz* 12(3): 81-88.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Díaz, and B. T. Buns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climate Change* 59(3): 369-388.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47: 37-59.
- Cook E. R., T. Bird, M. Peterson, M. Barbetti, B. M. Buckley, R. D. D'Arrigo, R. J. Francey and P. Tans. 1991. Climatic Change in Tasmania inferred from a 1089-year tree-ring chronology of Huon pine. *Science* 253: 1266-1268.
- Cook E. R. and R. L. Holmes. 1996. ARSTAN: Chronology development. *In*: Grissino-Mayer, H. D., R. L. Holmes, H. C. Fritts (eds.). *The International Tree-ring Data Bank Program Library, Version 2.0 User's Manual*. Laboratory of Tree-ring Research. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. pp. 75-87.
- Cook E. R. and K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree Ring Bulletin* 41: 45-53.
- Cottam, G. and J. T. Curtis. 1956. The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology* 37 (3): 451-160.
- Díaz-Castro, S., R. Touchan and T. W. Swetnam. 2001. A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Climatology* 21: 1007-1019.

Easterling, D. R., H. F. Diaz, A. V. Douglas, W. D. Hogg and K. E. Kunkel. 1999. Long term observations for monitoring extremes in the Americas. *Climatic Change* 42: 285-308.

Farjon, A. 2013. *Pinus lumholtzii*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e. T42377A2976271. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42377A2976271.en>. (28 de noviembre de 2016).

Florescano, E. y S. Swan. 1995. Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana. México, D.F., México. 246 p.

Fritts, H. C. 1976. *Tree-rings and Climate*. Academic Press. London, England. 582 p.

Fritts, H. C. and T. W. Swetnam. 1989. *Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments*. Hunton & Williams. Washington, DC, USA. pp. 111-188.

García, A. y M. S. González-Elizondo. 1998. *Pináceas de Durango*. Instituto de Ecología A. C. Centro Regional Durango. CIIDIR IPN Unidad Durango. Durango, Dgo., México, 179 p.

González-Cásares, M., M. Pompa-García and J. J. Camarero. 2016. Differences in climate-growth relationship indicate diverse drought tolerances among five pine species coexisting in Northwestern Mexico. *Trees* 31(2): 531-544.

González-Elizondo, M. 2003. *Indicadores de cambio climático en algunas especies de Pináceas de la Sierra Madre Occidental, México*. Tesis de Doctorado en Manejo de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Linares, N.L., México. 193 p.

González-Elizondo, M., E. Jurado, J. Návar, M. S. González-Elizondo, J. Villanueva, O. Aguirre and J. Jiménez. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681 - 2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management* 213: 39-53.

Holmes, R. L. 1996. COFECHA. *In*: Grissino-Mayer, H. D., R. L. Holmes and H. C. Fritts (eds.). *The International Tree-Ring Data Bank Program Library Version 2.0*

- User's Manual. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. pp. 48-55.
- Irby, C. M., P. Z. Fulé, L. L. Yocom and J. Villanueva-Díaz. 2013. Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques* 19(1):93-105.
- Krusic, P. J., R. L. Holmes and J. C. King. 1996. Medir Version 1.13 Measurement Program. *In: Grissino-Mayer, H. D., R. L. Holmes and H. C. Fritts (eds.). The International Tree Ring Data Bank Program Library, Version 2.0 User's Manual.* Lab. of Tree Ring Research. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. pp. 18-20.
- Lammertink, J. M., J. A. Rojas-Tome, F. M. Casillas-Orona and R. L. Otto. 1996. Status and conservation of old-growth forests and endemic birds in the pine-oak zone of the Sierra Madre Occidental Mexico. *Verslagen en Technische Gevens* 69: 1-89.
- Santillán-Hernández, M., E. H. Cornejo-Oviedo, J. Villanueva-Díaz, J. Cerano-Paredes, S. Valencia-Manzo y M. A. Capó-Arteaga. 2010. Potencial dendroclimático de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques* 16(1): 17-29.
- Speer, J. H. 2010. *Fundamentals of Tree-ring Research.* University of Arizona Press. Tucson, AZ, USA. 508 p.
- Stahle, D. W. and M. K. Cleaveland. 1993. Southern oscillation extremes reconstructed from tree-rings of the Sierra Madre Occidental and southern Great Plains. *Journal of Climate* 6(1): 129-140.
- Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva-Díaz, R. R. Heim Jr., F. K. Fye, J. Cerano Paredes, R. Acuna Soto and M. K. Cleaveland. 2011. Pacific and Atlantic influences in Mesoamerican over the past millennium. *Climate Dynamics* 39(6): 1431-1446.
- Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva, J. Cerano, F. K. Fye, R. D. Griffin, M. K. Cleaveland and D. K. Sthale. 2012. Tree-ring analysis of ancient baldcypress trees and subfossil wood. *Quaternary Science Reviews* 34: 1-15.

Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An Introduction to Tree-Ring Dating. The University of Chicago Press. Chicago, IL, USA. 73 p.

Swetnam, T. W., M. A. Thompson and A. K. Sutherland. 1985. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. Spruce budworms handbook. U.S. Department of Agriculture. Handbook No. 639. Washington, DC, USA. 39 p.

Villalba, R., P. E. Villagra, J. A. Boninsegna, M. S. Morales y V. Moyano. 2000. Dendroecología y dendroclimatología con especies del género *Prosopis*. *Multequina* 9 (2): 1-18.

Villanueva D., J. 1995. Influence of land-use and climate on soils and forest structure in mountains of the southwestern United States and northern Mexico. Ph.D. dissertation. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. 206 p.

Villanueva D., J., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell. 2000. Estado actual de la dendrocronología en México. *Revista Ciencia Forestal en México* 25(88): 5-36.

Villanueva D., J., J. Cerano P., L. Vázquez S., D. W. Stahle, P. Z. Fulé, L. L. Yocom, O. Franco R. y J. A. Ruiz C. 2015. Red dendrocronológica de pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas* 86: 5-14.

Villanueva-Díaz, J., L. Vázquez-Selem, A. Gómez-Guerrero, J. Cerano-Paredes, N. A. Aguirre-González y O. Franco-Ramos. 2016. Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tlaloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39(2): 175-185.

Villers-Ruiz, L. and I. Trejo-Vázquez. 1997. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research* 9: 87-93.

Villers-Ruiz, L. e I. Trejo-Vázquez. 1998. Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia* 23(1): 10-19.