

Análisis de sequías y productividad con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern., y su asociación con El Niño en el nordeste de México

Recibido: 3 de abril de 2008. Aceptado en versión final: 3 de diciembre de 2009.

María Rafaela Arreola-Ortiz*

José de Jesús Návar-Cháidez**

Resumen. Con tres cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco obtenidas en la Sierra Madre Oriental (SMO), en el estado de Nuevo León, México, se determinaron periodos de sequías y productividad analizando el patrón de crecimiento radial durante un lapso de 120 años. Se estudió la asociación entre el índice de crecimiento radial de las cronologías y los registros instrumentales de factores climáticos (precipitación y temperatura), obtenidos de cuatro estaciones meteorológicas vecinas a los sitios de muestreo. Se asociaron las cronologías con el índice multivariado del ENSO (MEI). Los resultados indican que en las cronologías resaltan cuatro periodos de sequías que se presentaron entre los años: 1885-1903, 1907-1937, 1950-1963 y 1998-2003. La productividad disminuye notablemente de 1.18 mm año⁻¹ de crecimiento radial en épocas húmedas a 0.82 mm año⁻¹ durante la presencia de sequías. Existe buena asociación

entre el Índice de Crecimiento Radial Estandarizado (ICRE) de las cronologías con la precipitación invernal observada. La reconstrucción de la precipitación invernal basada en las cronologías, muestra un ascenso paulatino a través del tiempo, desde 1880 hasta 2003. La correlación del ICRE de las tres cronologías y el MEI presenta buena asociación en la mayoría de los meses del año, principalmente, durante los meses que cubren las estaciones de otoño, invierno y primavera, indicando que el crecimiento del ancho de los anillos se ve favorecido con la presencia de bajas temperaturas y precipitaciones por arriba del promedio durante el invierno o la etapas primarias de la primavera.

Palabras clave: Reconstrucción climática, dendrocronologías, El Niño.

Analysis of drought and biomass productivity with *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern., chronologies and its association with the ENSO in Northeastern Mexico

Abstract. This research was conducted to construct chronologies, to understand climatic shifts, and to determine productivity changes of *Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco of the Sierra Madre Oriental mountain range of Nuevo León, México. Radial growth patterns, drought episodes and productivity data were studied from the tree rings growth patterns during a 120 years study period. We also studied

the association between recorded climate parameters and chronologies using data of four climatic stations. Chronologies were also associated to global scale climate events, the Multivariate ENSO Index (MEI) and climate parameters associated to chronologies were reconstructed. It was noted that chronologies show four main drought episodes (1885-1903, 1907-1937, 1950-1963, and 1998-2003) that hit

* Consultor Forestal Privado. Durango, México. E-mail: mrafaortiz@hotmail.com.mx

** CIIDIR-IPN Unidad Durango, Calle Sigma s/n, Fracc 20 de Noviembre II, 34220, Durango, Dgo., México. E-mail: jnavar@ipn.mx.

the highlands of northeastern Mexico. Productivity has a mean radial growth values of 0.82 mm y^{-1} and 1.18 mm y^{-1} during drought and wet episodes, respectively. There is a good association between chronologies and winter rainfall. Reconstructed winter rainfall shows an increasing pattern in time and the MEI is negatively associated to the chronologies indicating that the presence of wet and cold winters and early spring promote radial growth of trees in northern Mexico.

Key words: Climate reconstruction, dendrochronologies, El Niño.

INTRODUCCIÓN

El análisis de los anillos de crecimiento de los árboles centenarios mediante estudios dendrocronológicos posee varias aplicaciones en la investigación científica, tanto básica como aplicada. Estudios se han enfocado a la reconstrucción del clima sobre todo en lugares en donde existe escasa información climática y en sitios en donde se requiere la reconstrucción del clima del pasado. Villalba *et al.* (1998) realizaron la reconstrucción de la precipitación y temperatura para entender las variaciones de clima del pasado en la región subtropical de América del Sur. Con información dendrocronológica se han identificado y analizado periodos históricos de sequías o periodos muy húmedos por medio de la reconstrucción de la precipitación (Díaz *et al.*, 2002) y de escurrimientos hidrológicos (Burn *et al.*, 2004; González y Valdés, 2003).

Las sequías son episodios en donde llueve en general por debajo del promedio durante más de dos años consecutivos y trae consecuencias económicas desastrosas, sobre todo en regiones áridas y semiáridas. La dendrocronología se ha utilizado para encontrar frecuencias de sequías severas importantes en algunos países. Estudios dendrocronológicos indican que las sequías más severas a través de la historia en el norte de México y sur de Estados Unidos se presentaron durante los años 1700s (Stahle y Cleaveland, 1994). En diferentes países se reportan estudios de sequías severas a finales del siglo XIX y principios del XX (Liang *et al.*, 2003; Návar, 2008), 1930s, 1950s (Návar, 2001; Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2000; Návar, 2008). Para algunas regiones de México, se reportan sequías importantes en los años 1742, 1800s 1950s,

1974, 1980 y 1990s (González *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2002; Návar 2001, 2004, 2008).

En estudios eco-fisiológicos y de productividad se utiliza la dendrocronología para asociar el crecimiento a factores de precipitación y temperatura. Se reconoce que entre los factores climáticos, la precipitación invernal es el principal factor ambiental que influye de manera directa en el crecimiento radial de la vegetación en la región norte de México, independientemente de las condiciones locales (Unsel *et al.*, 2004; Basin, 2006; Díaz *et al.*, 2002; González *et al.*, 2005; Stahle y Cleaveland, 1994). Los factores que explican la presencia de sequías, de periodos apropiados para el crecimiento de los árboles, entre otros, se han asociado a eventos climáticos de escala sinóptica, los cuales fueron registrados en el pasado y, hoy pueden ayudar a explicar las variaciones en los parámetros descritos.

Las relaciones entre los índices de crecimiento y los elementos del clima provocados por eventos como El Niño/ENSO son parte importante del entendimiento ecológico de la dinámica de crecimiento de los bosques (Stahle y Cleaveland, 1993). A pesar de este conocimiento importante en el manejo de vegetación y recursos asociados con factores y componentes del clima, en el estado de Nuevo León no se han realizado estudios para entender y proyectar como eventos climáticos de escala sinóptica pueden modificar los patrones de crecimiento radial de los árboles en la Sierra Madre Oriental. Por tal motivo, se construyeron y analizaron tres cronologías de *Pseudotsuga menziesii* de las SMO con los siguientes objetivos: *a)* determinar las tendencias, productividad y reconstruir sequías del pasado en las cronologías; *b)* analizar la correlación entre los índices de crecimiento y la temperatura y precipitación; *c)* analizar la correlación entre índices de crecimiento y el evento climático El Niño, y *d)* reconstruir parámetros del clima del pasado utilizando las cronologías desarrolladas.

METODOLOGÍA

Para este estudio se utilizaron las cronologías de *Pseudotsuga menziesii* desarrolladas para tres sitios

en la Sierra Madre Oriental: El Potosí, La Marta y La Encantada cuyas características se describen a continuación y que se presentan en la Figura 1.

La Sierra La Marta se encuentra limitada por las coordenadas geográficas 25° 09' y 25° 15' N y 100° 20' y 100° 35' W (DETENAL, 1978). La ubicación del sitio de muestreo tiene las coordenadas UTM 0353647 (latitud) y 2790611 (longitud) con una altura de 3 100 msnm. De acuerdo con la clasificación de climas, este sitio presenta un clima del tipo C(E)x' que corresponde al tipo semifrío subhúmedo con lluvias escasas todo el año, con precipitaciones invernales mayores a 18%.

El Cerro El Potosí se ubica al oeste de la Sierra Madre Oriental, colindando con la Altiplanicie Mexicana (CETENAL, 1977), en el municipio de Galeana, Nuevo León, entre las coordenadas geográficas 24°50'45" y 24°53'16" N y los 100°13'09"

y 100°15'12" W. El sitio de muestreo se encuentra en las coordenadas UTM 0378879 y 2753615 a una altura de 2 624 msnm. Este sitio presenta un clima C(E)(w1)x' que corresponde al tipo semifrío subhúmedo con lluvias en verano con un porcentaje de lluvias invernales mayores de 10.2. Este sitio de muestreo se encuentra entre las isoyetas de 400 y 500 mm.

La Encantada es una comunidad boscosa que se localiza al sur del estado, dentro del municipio Zaragoza, Nuevo León, el cual está ubicado en las coordenadas geográficas 23°54' N y 99°47' W (DETENAL, 1978a). El sitio se encuentra a una altitud de 2 800 msnm. La ubicación de los sitios de muestreo tiene las coordenadas UTM 0418993 (latitud) y 26410118 (longitud) con un altura promedio de 3 100 msnm. En la región de la comunidad La Encantada se presentan tres tipos de clima:

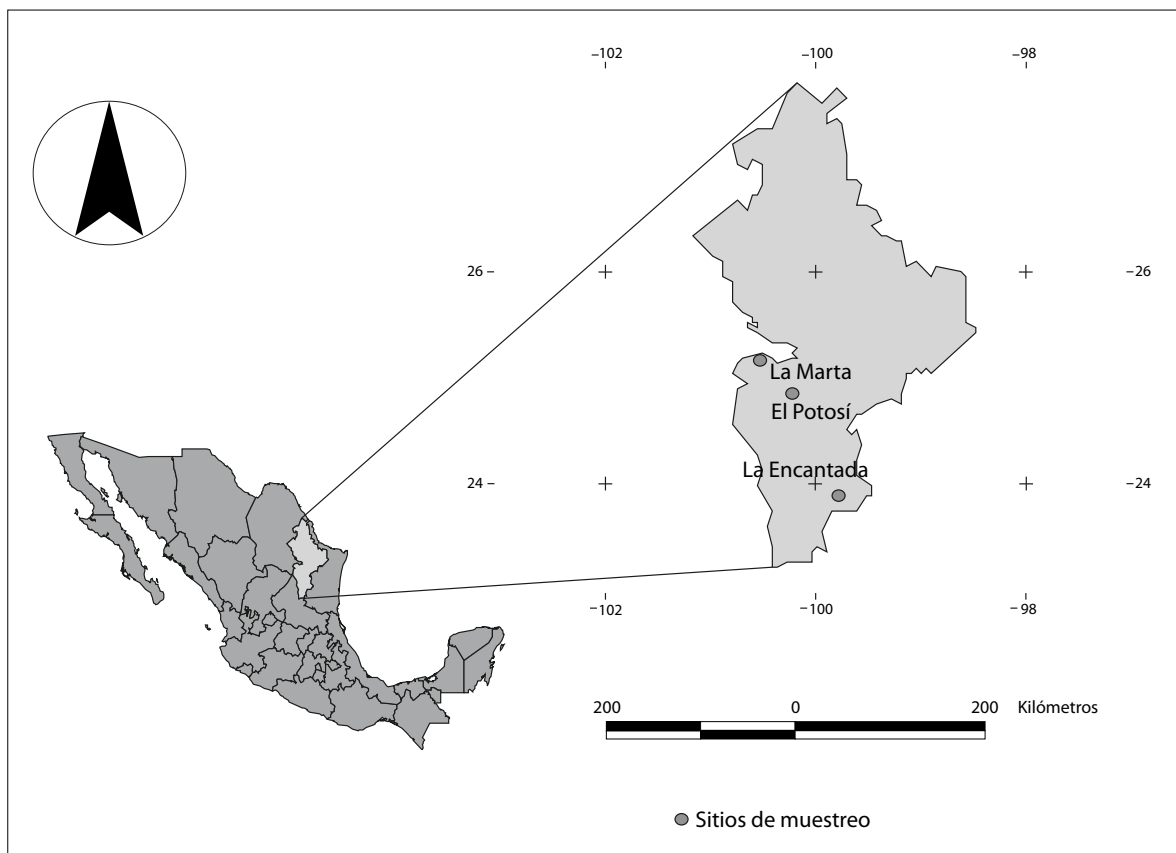


Figura 1. Ubicación de los sitios donde se obtuvieron las virutas para desarrollar las cronologías en *Pseudotsuga menziesii* en el estado de Nuevo León, México

Cw₁ en la zona de ubicación del pueblo, Bs₁(k'w) (templado-semiseco con pocas precipitaciones en verano) que colinda con el Altiplano Mexicano y (E)Cw₁ (templado-frío), perteneciente a las cumbres montañosas de más de 3 000 m de altura. La temperatura media anual del lugar oscila entre los 12 y los 18° C y la temperatura del mes más frío oscila entre -3 y 18° C, respectivamente.

Análisis e interpretación de la información

Los datos de índice de crecimiento radial estandarizado (ICRE) de las cronologías para los sitios El Potosí, La Marta y La Encantada se utilizaron para conocer tendencias, productividad y para reconstruir sequías, así como para analizar la correlación con parámetros climáticos El Niño y para reconstruir precipitación. El ICRE se estimó de la resta de la amplitud del anillo menos su promedio y todo esto se dividió por la desviación estándar. Se usaron valores de temperatura y precipitación registrados para la zona en estudio, reportados por las estaciones climatológicas más cercanas, así como valores del ENSO (El Niño/Southern Oscillation) tomados de la publicación de Internet (NOAA-CIRES, 2004). El análisis e interpretación de los resultados de esta investigación se desarrollaron con el siguiente procedimiento.

Observación de tendencias, sequías y productividad

El análisis de tendencias se observó con técnicas cuantitativas visuales (gráficas de las cronologías) y numéricas (ajuste de modelos estadísticos a los datos simples con tendencias móviles y acumulados). Se utilizó el índice de crecimiento estandarizado acumulado para magnificar y detectar las tendencias y patrones de las cronologías.

Correlación de las cronologías con los factores de clima y con el MEI

Se examinó la relación entre las tendencias del índice de crecimiento radial de las tres cronologías con factores de clima: temperatura, precipitación y con el fenómeno del Niño por medio del análisis de regresión y correlación de datos anuales de temperatura y precipitación, registrados en las estaciones climatológicas de la SMO, la Planicie

Costera y el Altiplano Mexicano, más cercanas al área en estudio. Las cuatro estaciones meteorológicas que se consideraron para la obtención de datos climáticos instrumentales reportados para las zonas muestreadas fueron: Iturbide, (clave-19027); La Carbonera, Galeana (clave-19032); 'El Potosí', Galeana (clave-19020) y Ciénega del Toro (clave-19013) ubicadas todas dentro de la Sierra Madre Oriental y cercanas a los sitios de muestreo.

En el análisis de la asociación de los anillos de crecimiento con los factores climáticos se aplicaron ecuaciones de regresión con los factores climáticos. Para conocer el grado de asociación de los parámetros de cronologías *vs* el MEI, se empleó el coeficiente de correlación junto con su prueba de significancia estadística a través de la prueba de *t* de Student.

Se reconstruyó la precipitación invernal debido a que ésta fue la variable climática que presentó una mejor asociación con el crecimiento radial de las cronologías. Se aplicaron diferentes ecuaciones utilizando análisis de regresiones lineales y no lineales a los valores de: índice de crecimiento de las cronologías y a los datos de precipitación registrados en la estación meteorológica Ciénega del Toro, que fue la que presentó mayor asociación estadística con los datos dendrocronológicos.

RESULTADOS

Tendencias, sequías y productividad mostradas por las cronologías. En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan las cronologías y los promedios móviles de cinco años de El Potosí, La Marta y La Encantada, respectivamente. En el patrón de desarrollo de las tres cronologías se observan tendencias de ascenso y descenso por periodos cortos, así como ciclicidades irregulares e inconsistentes. Se observan consistencias de datos en algunos ciclos de tiempo favorable en las tres cronologías.

En las gráficas de las cronologías estandarizadas acumuladas sobresalen claramente cuatro periodos de sequías: dos de duración prolongada y dos de duración corta. El primer periodo de sequía reconstruido se presentó entre 1880 y 1903, observándose una mayor temporalidad de la sequía en el sitio de

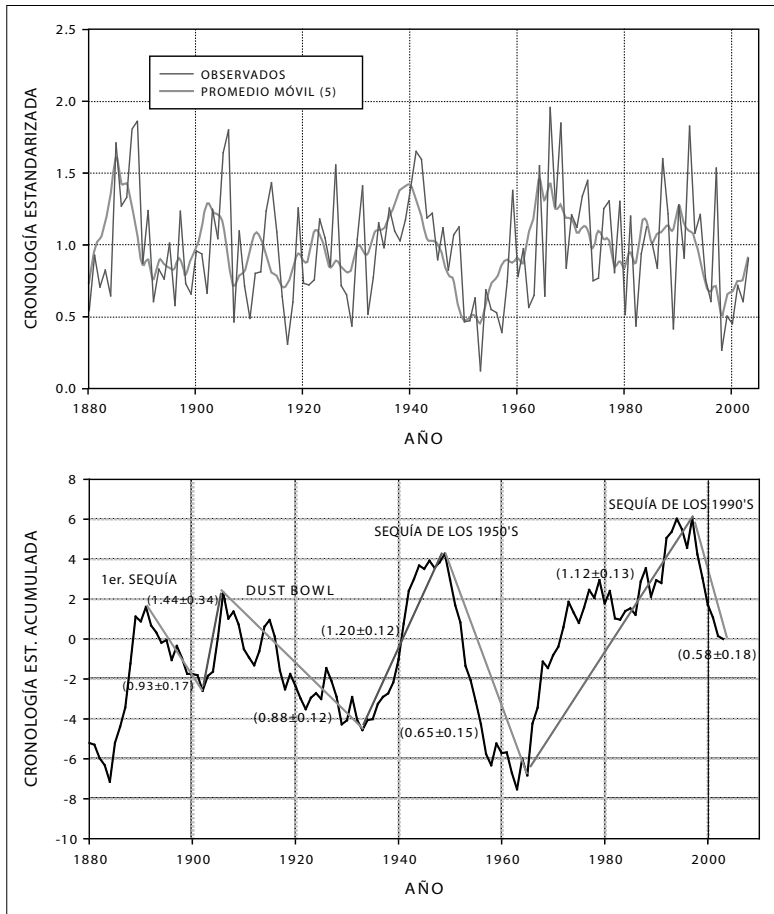


Figura 2. Promedio móvil a cinco años e índices de crecimiento estandarizados acumulados, con los crecimientos radiales promedio y su intervalo de confianza para la cronología El Potosí.

La Marta (23 años) y menor en La Encantada (siete años). El segundo periodo de sequía se presentó entre 1907 y 1937. Esta sequía se observa con una mayor duración en La Encantada (30 años) seguida de La Marta (28 años). El tercer periodo seco se presentó durante la década de los años cincuenta permaneciendo hasta mediados de los ochenta en La Marta y La Encantada, y hasta 1963 en El Potosí, teniendo La Encantada la mayor temporalidad de la sequía (34 años). El cuarto periodo seco se presentó a finales de los noventa iniciando prácticamente en 1998, con una duración de cinco años en los tres sitios estudiados (Figuras 2, 3 y 4).

De las sequías que se presentaron en el siglo XX y parte del XIX, en general, en los tres sitios se marcan magnitudes importantes (Cuadro 1). En cuanto a la primera sequía reconstruida en La Encantada, se observa la duración más corta (siete años) pero la mayor intensidad, indicada por una

fuerte pendiente (94; Cuadro 1, Figuras 2 y 3). En el periodo de principios del siglo XX, Dust Bowl, en las tres cronologías se observa una erraticidad importante y la sequía más intensa se observa para El Potosí, mientras que en la Encantada ésta muestra poca intensidad con una pendiente bastante baja (04). Cabe aclarar que a pesar de que en este sitio la ocurrencia de sequía no cubre el tiempo indicado para este término (1930s Dust Bowl), por cuestiones prácticas de interpretación en este estudio, se designó igual que en los otros dos casos. La pendiente del Dust Bowl en La Encantada se presenta con una serie de interrupciones de precipitaciones importantes. La sequía de los cincuenta en general dura de 1949 a 1962 para las tres cronologías, aunque se prolongó por más tiempo en La Encantada, con 34 años con varias interrupciones importantes, pero fue más intensa en El Potosí, con una pendiente mucho más pronunciada. Respecto

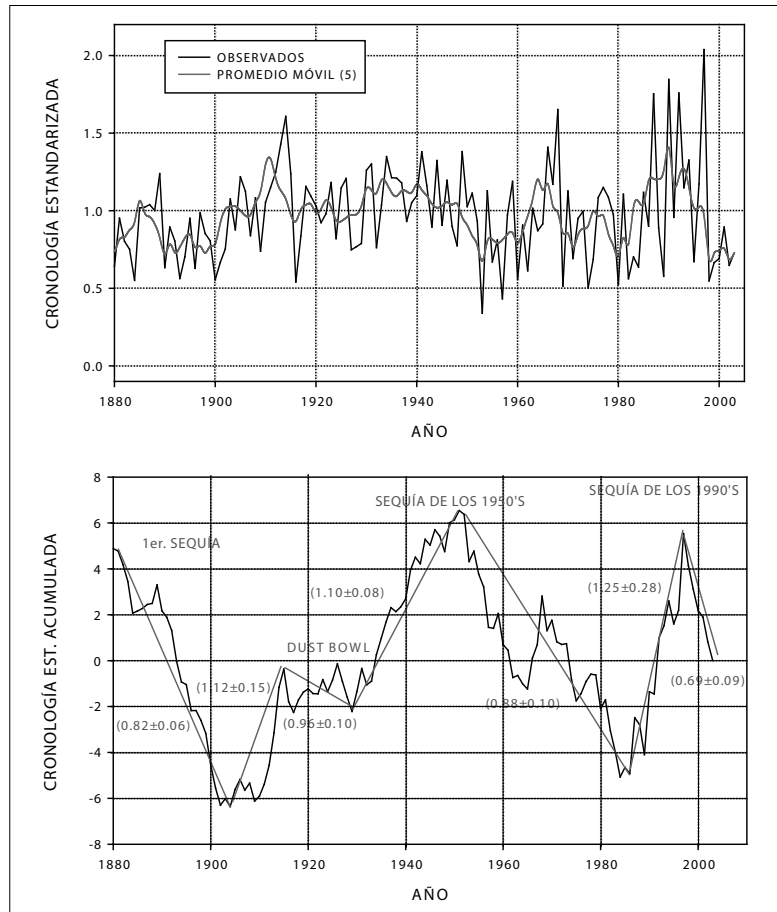


Figura 3. Promedio móvil a cinco años e índices de crecimiento estandarizados acumulados con los crecimientos radiales promedio y su intervalo de confianza para la cronología La Marta.

a la sequía de los noventa, se observa una intensidad bastante fuerte en El Potosí y La Marta con pendientes de 85 y 83, respectivamente, mientras que en La Encantada la intensidad fue mucho más baja (23).

Las cronologías muestran algunas diferencias, en varios casos significativas, entre los periodos secos y húmedos (Figuras 2, 3 y 4). En lo que respecta al análisis de productividad, los valores promedio en milímetros (\pm intervalos de confianza, con $\alpha=0.05$) del crecimiento del ancho de los anillos presenta una gran similitud entre las diferentes cronologías, resultando en promedio un incremento de 0.818 mm durante los periodos de sequía y un aumento a 1.18 mm durante los periodos húmedos, con un rango de error general de 0.14 mm (Cuadro 2) que los separa estadísticamente.

El incremento promedio de los anillos en los periodos húmedos para los sitios de El Potosí, La

Marta y La Encantada son: 1.25, 1.16 y 1.14, respectivamente. Mientras que los promedios en los periodos de sequía son: 0.76, 0.84 y 0.86 para las mismas dendrocronologías, respectivamente (Figuras 2, 3 y 4; Cuadro 2). Lo anterior indica que de manera similar en los tres sitios, existe una importante reducción de la productividad durante las condiciones de sequía.

Asociación de los patrones y tendencias con factores y eventos climáticos. La asociación entre los índices de crecimiento de las tres cronologías y la temperatura registrada por las diferentes estaciones meteorológicas de la región (Iturbide, La Carbonera, El Potosí y Ciénega del Toro) no presentó correlación importante. Sin embargo, las cronologías tuvieron buena correlación con los valores de la precipitación registrada en la estación meteorológica Ciénega del Toro y no muy buena para el resto de las estaciones, por lo que única-

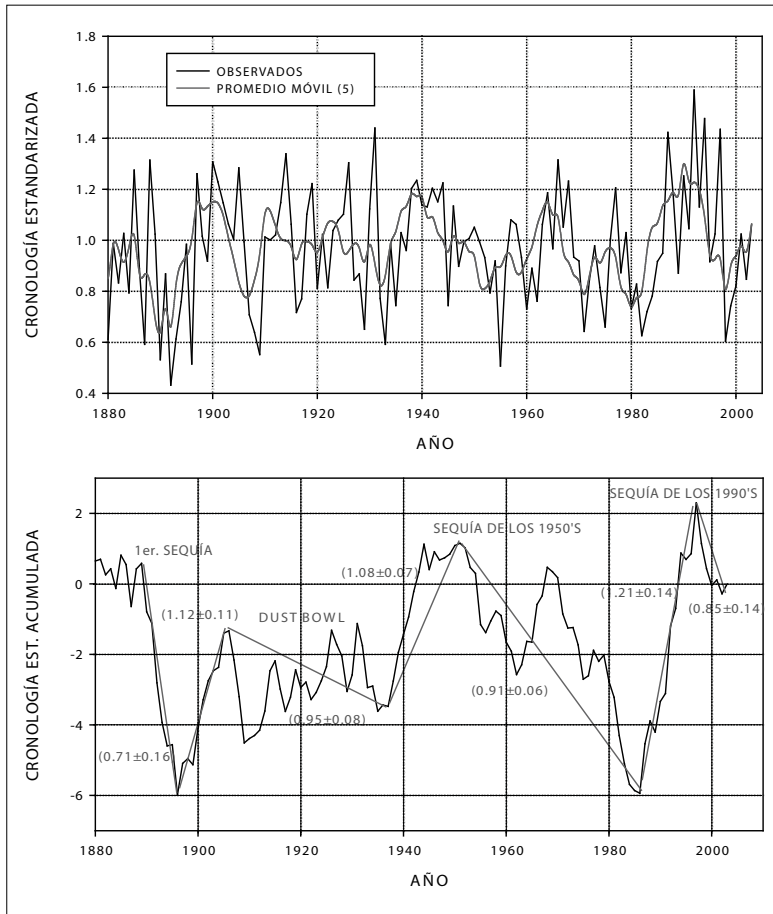


Figura 4. Promedio móvil a cinco años e índices de crecimiento estandarizados acumulados con los crecimientos radiales promedio y su intervalo de confianza para la cronología La Encantada.

Cuadro 1. Duración e intensidad de los periodos de sequía mostrados por las cronologías de El Potosí, La Marta y La Encantada

SITIO	1er. Sequía		Dust Bowl		Sequía de los cincuenta		Sequía de los noventa	
	Duración (años)	Inte (pen)	Duración (años)	Inte (pen)	Duración (años)	Inte (pen)	Duración (años)	Inte (pen)
El Potosí	13 (1889-1902)	29	28 (1907-1935)	18	13 (1950-1963)	81	5 (1998-2003)	85
La Marta	23 (1880-1903)	47	14 (1915-1929)	13	23 (1953-1985)	39	5 (1998-2003)	83
La Encantada	7 (1889-1896)	94	30 (1907-1937)	04	34 (1952-1986)	20	5 (1998-2003)	23

donde Inte = Intensidad, pen = pendiente.

Cuadro 2. Promedio del ancho de anillos de crecimiento (mm) para los periodos secos y húmedos y sus intervalos de confianza, para las cronologías de los tres sitios estudiados

Sitios Periodos	El Potosí	La Marta	La Encantada
Periodos secos:	0.93 ± 0.18	0.83 ± 0.19	0.71 ± 0.07
	0.88 ± 0.12	0.87 ± 0.11	0.82 ± 0.06
	0.65 ± 0.14	0.88 ± 0.10	0.91 ± 0.06
	0.58 ± 0.12	0.69 ± 0.08	0.85 ± 0.13
Periodos húmedos:	1.44 ± 0.18	1.12 ± 0.07	1.12 ± 0.05
	1.20 ± 0.13	1.06 ± 0.06	1.02 ± 0.06
	1.12 ± 0.15	1.25 ± 0.28	1.21 ± 0.15

mente se utilizaron los datos de esta estación en la reconstrucción del clima.

Los resultados arrojados en el análisis de regresión revelan que la precipitación invernal se asocia adecuadamente con el ICRE, principalmente la precipitación que se presenta durante el periodo de invierno y parte inicial de la primavera (enero, febrero y marzo), lo cual indica que la variabilidad del ancho de los anillos de crecimiento recibe cierta influencia de la precipitación que se registra durante la dormancia o inmediatamente después de iniciar el crecimiento durante los primeros meses del año. Esta observación tiene relevancia fisiológica sobre todo en suelos delgados o poco profundos que no almacenan mucha agua durante la fase tardía del crecimiento del año anterior. Entonces, estos suelos contienen humedad durante, o inmediatamente después, de presentarse las precipitaciones. Las precipitaciones de finales de la primavera, verano y otoño no estuvieron relacionadas estadísticamente con el crecimiento radial, lo que se explica porque posiblemente el balance hidrológico de esta etapa es más negativo que durante la etapa tardía del invierno e inicio de la primavera. Otra explicación puede ser que la velocidad de toma del agua por las raíces de los árboles no es tan rápida como la evaporación o percolación del agua de lluvia que se presenta. Las características de frecuencia y cantidad de la lluvia pueden jugar otro papel importante en esta relación. Nívar *et al.* (1999) observaron que en el nordeste de México por sobre el 60% de las lluvias poseen cantidades menores de 5 mm, que posible-

mente se interceptan en su mayoría en el dosel y el mantillo y que en su conjunto explican cerca del 40% de la cantidad total de la precipitación. Además, las lluvias importantes en el humedecimiento del suelo, la recarga de acuíferos y la producción de caudales se presentan generalmente a finales del verano, cuando a los árboles les queda poco tiempo para producir biomasa debido al inicio del invierno y la consecuente iniciación de la dormancia.

Los análisis estadísticos muestran que de los tres sitios estudiados, La Encantada tiene el valor más alto de R² ajustada, que explica el 37% de los datos analizados con un error de 0.7 mm (Cuadro 3). Sin embargo, El Potosí, a pesar de contar con un 25% de la explicación de variación de sus datos, presenta una mejor correlación, mayor que la de los otros dos sitios, arrojando un valor 0.0014 en la Pr >F. Esto se explica por la mayor cantidad de información presente en dicha cronología. Estadísticamente, la cronología que tiene la mejor asociación con la precipitación invernal es la de El Potosí seguida de la de La Marta y por último la de La Encantada (Cuadro 3).

Reconstrucción de la precipitación. Se realizó la reconstrucción de la precipitación invernal para la región en estudio, utilizando los registros de precipitación reportados por la estación meteorológica Ciénega del Toro y el ICRE promedio de las cronologías. Con los índices de crecimiento radial de las cronologías se logró la reconstrucción de la precipitación invernal para un periodo de más de 100 años cubriendo desde 1860 hasta 2003 (Figura 5). En la figura se observa que en el transcurso de

Cuadro 3. Análisis estadístico para la asociación de la precipitación y el índice de crecimiento radial de las tres cronologías

Sitio	Modelo	R ²	R ² Aju	Sx	Pr >F	F
La Encantada	IC=0.16924+0.01886(Pinv)	0.4287	0.372	0.70	0.0209	7.50
La Marta	IC=-0.12249+0.03514(Pinv)	0.4149	0.362	1.28	0.0175	7.80
El Potosí	IC=-0.29249+0.02619(Pinv)	0.2758	0.253	0.98	0.0014	12.19

donde: IC = Índice de crecimiento; Pinv = Precipitación invernal; R² = Coeficiente de determinación; R² Aju = Coeficiente de determinación ajustada; Sx = Error estándar del modelo; Pr>F = Probabilidad de F; F = Valor observado.

1860 a 2003, se presentaron cuatro lapsos de tiempo con baja o nula precipitación invernal: 1. de 1871-1885, 2. de 1892-1902, 3. de 1950-1963 y, 4. de 1998-2003, consistentes también con los periodos secos detectados. También se pueden apreciar cuatro grupos anuales con más o menos buena precipitación, éstos cubren un promedio de seis años en los periodos de 1860-1866, 1885-1889, 1939-1944 y 1990-1994 con una precipitación promedio de 28 mm, 34, 32 y 42, respectivamente (Figura 5).

Los valores más altos que se registraron durante el periodo de tiempo considerado (143 años) fueron de 78 y 87.8 mm correspondientes a la precipitación de 1997 y 1992, respectivamente. En la gráfica se observa que la precipitación invernal ha ido aumentando ligeramente durante el transcurso del tiempo, ya que los registros de mayor precipitación se ubican a partir de 1960.

Asociación del MEI con el Índice de Crecimiento Radial Estandarizado

El MEI mensual. El coeficiente de correlación entre el índice multivariado MEI y el índice de

crecimiento radial estandarizado (ICRE) resultó estadísticamente significativo para las tres cronologías y en general negativo para la mayoría de los meses del año. Esto es indicativo de que los valores del MEI son negativos indicando la presencia del fenómeno El Niño y muestran una alta asociación con el desarrollo del ancho de los anillos. Los resultados de la correlación del MEI y el ICRE de las tres cronologías se comportan con diferencias significativas como se puede ver en la Figura 6. Los resultados de la correlación para las cronologías de La Encantada y La Marta son mayores durante los meses de septiembre y octubre, principalmente, y en menor medida en noviembre; esto posiblemente está dado por la similitud de la altura de los lugares de muestreo (3 000-3 100 msnm). En El Potosí la relación más alta entre el ICRE y MEI se presenta en los meses de enero y marzo, en donde el rango de altura de ubicación del muestreo está entre 2 300-2 800 msnm. Lo anterior explica posiblemente la diferencia en el efecto del clima con la altitud sobre el nivel del mar (Figura 5). El comportamiento de la asociación del MEI con el ICRE en La Encanta-

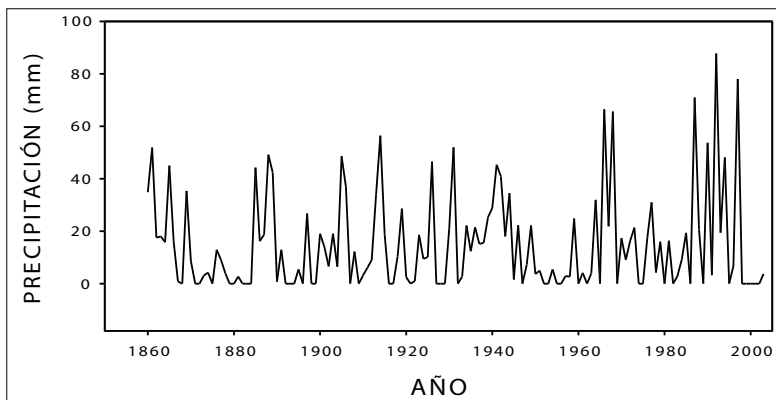


Figura 5. Reconstrucción de la precipitación invernal con el índice de crecimiento de las tres cronologías.

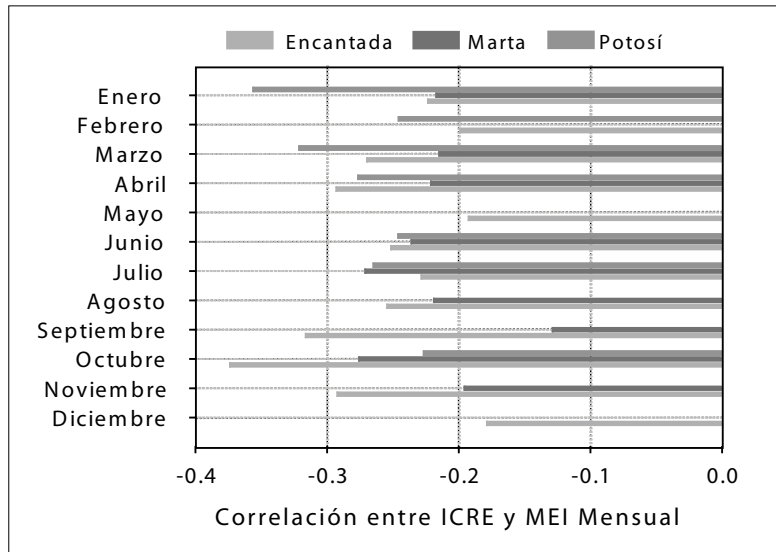


Figura 6. Relación del MEI mensual con el ICRE de las cronologías.

da tiene una tendencia positiva, presentando un aumento gradual desde enero a octubre; lo mismo sucede para el caso de La Marta, aunque con valores de correlación un poco menores. En el caso de El Potosí, el comportamiento de la correlación es inverso, ya que inicia en enero con una relación alta que va disminuyendo durante el transcurso del año, no presentando valores en los meses de mayo, agosto, septiembre, noviembre y diciembre (Figura 6).

De acuerdo con los resultados de la correlación entre el ICRE y el MEI, se puede explicar que el crecimiento de los anillos de los árboles está relacionado con las variables climáticas que se presentan durante el fenómeno del ENSO.

La correlación entre el MEI y el ICRE de las cronologías, por periodo estacional del año anterior, resultó estadísticamente significativo sólo para algunas cronologías y estaciones. Esto quiere decir que solo la variabilidad climática de determinada estación del año pasado influye en el ancho del anillo de crecimiento del presente año. En La Encantada existe una mayor correlación del ICRE con el MEI del verano anterior, La Marta se correlaciona únicamente con el MEI del otoño anterior y El Potosí tiene una alta correlación con el MEI observado en las estaciones de verano y otoño del año anterior.

En resumen, las correlaciones del índice de crecimiento de las cronologías con las variables climáticas del MEI mensual, estacional y anual indican

que las cronologías La Marta y La Encantada tienen una relación con el MEI muy similar en tiempos, mientras que El Potosí contrasta totalmente a esta tendencia. La mejor relación de las cronologías de La Marta y La Encantada con los parámetros del clima se presenta durante los meses de mayo a diciembre al igual que con el MEI anual, sin embargo, la relación más fuerte de estas dos cronologías se observa en la correlación con la estación verano-otoño. La relación entre el ICRE de El Potosí con la variación climática del MEI presenta valores más altos durante los meses de diciembre a marzo, mientras que con el MEI anual tiene una relación relativamente baja (0.04). Lo anterior indica que el mejor desarrollo en diámetro de los bosques de *Pseudotsuga* de los sitios de La Marta y La Encantada se produce en las estaciones de verano y otoño, mientras que para el sitio de El Potosí sucede en el periodo de invierno-primavera. Los suelos, y en específico la profundidad para almacenar agua que se utiliza durante la estación de crecimiento, pueden explicar estas diferencias estacionales en las correlaciones.

DISCUSIÓN

Los periodos secos más sobresalientes que se observan en los índices estandarizados de las tres cronolo-

gías son de 1890 a 1907; de 1915 a 1935; de 1949 a 1962; y de 1998-2004. Estos ciclos de sequías son consistentes con los reportados por García y Hernández (1988) para México y por Návar (2008) para el norte de México. Es posible que este primer periodo seco haya desencadenado la Revolución Mexicana de 1910. El segundo periodo de sequía, conocido como Dust Bowl o Tazón del Polvo en varios estados de Estados Unidos (Texas, Oklahoma, Kansas, entre otros) se vieron fuertemente afectados en la década de los años veinte y los treinta (Bonnifield, 2005; Fanslow, 1998), se presentó entre 1907 y 1937. En México, los censos agrícolas reportaron una pérdida total de 1.2 M ha, 17% del área cultivada, con la mayoría de las pérdidas registradas en los estados de Nuevo León (40%) y San Luis Potosí (50%; Liverman, 1995). La sequía de los cincuenta presenta la mayor severidad de los periodos registrados y parece que cubrió todo el norte de México, por la consistencia que presenta con las sequías observadas en otros estudios (González *et al.*, 2005; Návar, 2008). En Durango, la precipitación se redujo en un 15% durante este periodo (Cleaveland *et al.*, 2003) y valores extremos del índice de severidad de sequía de Palmer de -6.20 fueron documentados (Cook *et al.*, 1999). A pesar de este estado, la superficie irrigada aumentó 32% en la década de los cincuenta (Yates, 1981) como consecuencia de la construcción de grandes embalses y como resultado, las pérdidas económicas en la agricultura fueron del orden de los cientos de millones de pesos en Durango, Coahuila y Chihuahua (Cleaveland *et al.*, 2003). La sequía de los noventa inicia a finales de la década, lo que es inconsistente con los datos climáticos registrados y analizados (Návar, 2004) para la cuenca del río San Juan, donde se observan sequías desde finales de 1989 pero interrumpidas por los huracanes Hernán y Dolly de mediados de los noventa. La sequía de los noventa causó también problemas sociales entre entidades políticas mexicanas; entre Nuevo León y Tamaulipas por las aguas del río San Juan (aguas del embalse El Cuchillo), al igual que entre los estados de Sonora y Sinaloa por las aguas del Río Fuerte (aguas del embalse Huites). Se implementaron proyectos y programas gubernamentales para hacer llover en Sinaloa,

Durango, Coahuila y Nuevo León. México como nación, solicitó ayuda hidrológica al gobierno de Estados Unidos y para el 2002 el tratado de Aguas Internacionales por las aguas del río Bravo reveló ser obsoleto ante estos nuevos escenarios debido a la falta de cumplimiento por parte de México en lo que corresponde al nordeste de México. Entre 2000 y 2003 existieron 15 conflictos violentos relacionados directa o indirectamente por el agua y 12 de éstos se relacionaron con el desarrollo de infraestructura para el uso compartido de recursos hidrológicos (Gleick, 2004).

La regionalización del clima notada en estas tres cronologías por la inconsistencia en algunos periodos secos y las bajas correlaciones, parece no sólo estar en función de la latitud y longitud (Díaz *et al.*, 2002; 2003) sino que también la altitud sobre el nivel del mar juega un papel importante en la presencia-ausencia de sequías, como se observa en este reporte, en contraste con las sequías registradas por Návar (2004). Por ejemplo, la última sequía se reporta para las tres cronologías a partir de 1998, mientras que para las planicies y llanuras ésta se reporta desde 1989. Es decir, parece ser que la sequía evoluciona también en altitud con un desplazamiento en tiempo de aproximadamente diez años.

De acuerdo con los resultados de la correlación entre el ICRE y el MEI, se puede explicar que el crecimiento de los anillos de los árboles está relacionado con las condiciones climáticas que se presentan durante el fenómeno del ENSO en esta parte de México. Inviernos fríos y húmedos poseen un balance hidrológico positivo por periodos más largos de tiempo y esto ocasiona una mayor disponibilidad de agua para el crecimiento de los árboles. Estas condiciones climáticas son típicas durante la presencia de fenómenos El Niño, como ha sido observado por Cavazos y Hastenrath (1992), por Méndez *et al.*, (2008) para México y por Pavia y Badana (1998) para climas mediterráneos del noroeste de México. Relaciones positivas entre el ENSO y el crecimiento radial de los árboles han sido también reportadas en otros trabajos de investigación para México (Magaña *et al.*, 1999; González *et al.*, 2005). Es posible que el incremento de los anillos de los árboles no sea constante durante todo

el año, sobre todo cuando se presentan lluvias con una alta variación estacional.

La información indica que la presencia de eventos ENSO está aumentando paulatinamente en esta región del nordeste de México, posiblemente a consecuencia de las variaciones climáticas señaladas en muchos reportes de investigación (IPCC, 2007). Parece entonces existir la paradoja de que los árboles están creciendo a mayores ritmos diamétricos en el presente y, sin embargo, las poblaciones de esta especie están contrayéndose. El IPCC (2007) señala que el cambio climático puede afectar la superficie forestal por alterar la frecuencia, intensidad, duración y el tiempo de los incendios, las sequías, las especies introducidas, las plagas y enfermedades, los huracanes, las tormentas y las avalanchas. Nívar *et al.* (2005) presenta evidencia cuantitativa de la reducción de la productividad del orden de casi media tonelada por hectárea por año para poblaciones de pino por efecto de la sequía de los noventa en el norte de México, en contraste con la productividad de los ochenta. Es decir, aunque se estén presentando con mayor frecuencia inviernos fríos y húmedos, las sequías parecen estar también magnificándose, lo que finalmente se refleja en una potencial reducción del crecimiento y como consecuencia de la productividad, lo que hace que estas poblaciones de *P. menziensis* se encuentren estresadas por estas variaciones climáticas que podrían estarse magnificando por el potencial cambio climático (Mulholland *et al.*, 1997).

CONCLUSIONES

Las tres cronologías (El Potosí, La Marta y La Encantada) muestran periodicidades secas y húmedas con inconsistencia errática en tiempo. Los principales periodos secos observados fueron de 1890 a 1907, de 1915 a 1935, de 1949 a 1962 y de 1998 a 2004. El incremento radial de los anillos durante los periodos húmedos es en promedio 1.18 mm año⁻¹, mientras que este valor disminuye hasta 0.82 mm año⁻¹ en periodos de sequías, con implicaciones importantes en la productividad. Climas fríos y lluviosos durante el invierno y la primavera son importantes para el crecimiento

radial de los individuos de *P. menziensis* en Nuevo León, México. Estos eventos climáticos son ocasionados por el fenómeno El Niño, por su mejor asociación con los índices de crecimiento radial de las tres cronologías. La Niña parece crear condiciones desfavorables para el crecimiento radial de *P. menziensis*. La falta de consistencia entre las correlaciones entre estaciones indica que existe una fragmentación del clima a escalas espaciales cortas en el eje tridimensional.

RECONOCIMIENTOS

Los autores de este reporte de investigación agradecen a los árbitros anónimos quienes mejoraron la redacción de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Basin (Boulder Area Sustainability Information Network; 2006), *Streamflow reconstructions from tree rings: an example from Middle Boulder Creek*, NOAA Paleoclimatology Program National Geophysical Data Center.
- Bonnfield, P. (2005), *1930's Dust bowl. Excerpts from "The dust bowl, men, dirt and depression"* [<http://www.Magazines.com/science/nature/disaater.htm>].
- Burn, D. H., J. Wychreschuk and D. V. Bonin (2004), "An integrated approach to the estimation of streamflow drought quantiles", *Hidrological Sciences Journal*, volume: 49 Issue: 6 page(s), pp. 1011-1024.
- Cavazos, T. and S. Hastenrath (1990), "Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation", *International Journal of Climatology*, no. 10, pp. 377-386.
- CETENAL (1977), *Carta Topográfica. Sierra La Marta. G14 C45 Coahuila y Nuevo León*, escala 1:50 000, México.
- Cleaveland, M. K., D.W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Diaz and B.T. Burns (2003), "Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico", *Climatic Change*, no. 59, pp. 369-388.
- Cook, E. R., D. M. Meko, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland (1999), "Drought reconstructions for the continental United States", *J. Climate*, no. 12, pp. 1145-1162.
- DETENAL (1978), *Carta Topográfica. C. El Potosí. G14 C56, Nuevo León*, escala 1:50 000, México.

- DETENAL (1978a), *Carta Topográfica. Zaragoza, N. L. – Tamaulipas. F14 A17*, escala 1:50 000, México.
- Díaz Castro, S. C., M. D. Therrell, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland (2002), “Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992”, *Climate Research*, no. 22, pp. 237-244.
- Díaz Castro, S. C., L. Z. Brito, C. A. Salinas y A. Douglas (2003), “Dendrocronología, una herramienta para reconstruir escurrimientos superficiales en la vertiente continental del Golfo de California”, *Resúmenes IV Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Nuevas Tecnologías para el Manejo Forestal*, San Luis Potosí, México, p. 32.
- Fanslow, R. A. (1998), “The migrant experience”, American Folklife Center, Library of Congress [http://memory.loc.gov/ammem/afchhtml/tsme.htm].
- García, E. y M. E. Hernández (1988), “Anomalías de la precipitación en la República Mexicana de 1921 a 1980”, *Revista de Geografía*, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, México, pp. 1-24.
- Gleick, P. H. (2004), “The millennium development goals for water: crucial objectives, inadequate commitments”, in Gleick, P. H. (ed.), *The World's Water, 2004-2005*, Island Press, Washington, D.C.
- González, J. and J. B. Valdés (2003), “Bivariate drought recurrent analysis using tree-ring reconstructions”, *J. Hydrologic Engineering*, 8(5), pp. 247-258.
- 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”, *For. Ecol. and Manag.*, no. 213, pp. 39-53.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007. The Scientific Basis*, Third Assessment Report, WMO, UNEP, Roma, Italia.
- Liang E., X. Shao, Z. Kong and J. Lin (2003), “The extreme drought in the 1920s and its effect on tree growth deduced from tree ring analysis: a case study in North China Ann. INRA”, *EDP Sciences For. Sci.*, no. 60, pp. 145-152.
- Liverman, D. M. (1995), “Economic and environmental change in Mexico”, *A paper delivered at the First Open Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change*, Duke University, June.
- Magaña, V., J. V. Pérez, E. Carrisosa y J. Pérez (1999), “El Niño y el clima”, en Magaña, R.V. (ed.), *Los impactos del Niño en México*, UNAM y Dirección de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México.
- Méndez-González, J., J. J. Návar y O.V. González (2008), “Análisis de tendencias de la precipitación (1920-2004) en México”, *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 65, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 38-55.
- Mulholland, P. J., G. R. Best, C. C. Coutant, G. M. Hornberger, J. L. Meyer, P. J. Robinson, J. R. Stemberg, R. E. Turner, F. Vera-Herrera and R. G. Wetzel (1997), “Effects of climate change on freshwater ecosystems of United States and the Gulf of Mexico”, *Hydrological Processes*, no. 11, pp. 949-970.
- Návar, J., F. Charles and E. Jurado (1999), “Spatial variations of interception loss components by Tamaulipan thornscrub in northeastern Mexico”, *Forest Ecology and Management*, pp. 231-239.
- Návar, J. (2001), “Water supply and demand scenarios in the San Juan watershed”, *Geofísica Internacional*, 40(2), pp.121-134.
- Návar, J. (2004), “Water supply and demand scenarios in the Lower Río Bravo/ Río Grande basin: the irrigated agriculture scenario”, *Geofísica Internacional*, 43(3), pp. 495-506.
- Návar, J., M. González-Elizondo, S. González-Elizondo, M. A. Márquez-Linares y E. Merlín-Bermúdez (2005), “Diversidad, estructura y productividad en ecosistemas forestales templados de Durango, México”, *Divulgación*, núm. 6, pp. 35-37.
- Návar, J. (2008), “Reconstrucción de las sequías en los últimos 10 000 años en el norte de México”, *AGROFAZ*, núm. 8, pp. 41-53.
- NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (2004), Document maintained by Klaus Wolter (klaus.wolter@noaa.gov), update: April 19, 14:43:11 MDT [http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei_index.html].
- Pavia, E. G. and A. Badana (1998), “ENSO modulates rainfall in the Mediterranean California”, *Geophysical Research Letters*, no. 25, pp. 3855-3858.
- 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*, no. 6, pp. 129-140.
- Stahle, D. W. and M. K. Cleaveland (1994), “Tree-ring reconstructed rainfall over the southeastern U.S.A. during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age”, *Climatic Change*, no. 26, pp. 199-212.
- Unsel, R., H. P. Kahle and H. Spiecker (2004), *Methods to detect large-scale spatial patterns of forest growth and their practical applications*, Institute for Forest Growth; University of Freiburg Tennenbachers-trasse 4, 79085 Freiburg Germany [instww@iww.uni-freiburg].

- Villalba, R., H. R. Grau, J. A. Boninsegna y A. Ripalta (1998), "Intensificación de la circulación atmosférica meridional en la región subtropical de América del Sur inferida a partir de registros dendroclimatológicos", *Boletín del Instituto Francés d' Etudes Andines*, tomo 27, núm. 3, Ministerio de Relaciones Exteriores de Francia, Lima, Perú, pp. 565-579.
- Villanueva, D. J., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland y M. D. Therrell (2000), "Ciencia Forestal en México. Estado actual de la dendrocronología en México", *Revista Ciencia Forestal en México*, México, vol. 25, núm. 88.
- Yates, P. L. (1981), *Mexico's Agricultural Dilemma*, University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA.