

# VARIABILIDAD HISTÓRICA DE LA PRECIPITACIÓN RECONSTRUIDA CON ANILLOS DE ÁRBOLES PARA EL SURESTE DE COAHUILA

## HISTORIC VARIABILITY OF RECONSTRUCTED PRECIPITATION WITH TREE-RINGS FOR SOUTHWESTERN COAHUILA

Julián Cerano Paredes<sup>1</sup>, José Villanueva Díaz<sup>1</sup>, Ricardo David Valdez Cepeda<sup>2</sup>, Eladio Heriberto Cornejo Oviedo<sup>3</sup>, Ignacio Sánchez Cohen<sup>1</sup> y Vicenta Constante García<sup>1</sup>

### RESUMEN

En la Sierra de Arteaga del estado de Coahuila, México, se generaron cinco cronologías de madera temprana, madera tardía y anillo total de *Pseudotsuga menziesii* para las montañas La Viga, El Coahuilón, El Tarillal, Los Pilares y El Morro. Un Análisis de Componentes Principales (PCA) indicó que las cinco cronologías presentan una variabilidad común ( $p < 0.001$ ); el componente uno (PC1) explica 72% de la variabilidad, sin embargo, se eliminó la cronología El Morro por tener la más baja correlación. Con las cronologías restantes se desarrolló una regional de 302 años de extensión (1700 a 2001). Mediante un análisis de Función de Respuesta se definió que los crecimientos de madera temprana y tardía responden a la precipitación invierno-primavera. Debido a que la madera tardía explica 50% de la variabilidad en precipitación, se optó por trabajar con la madera temprana para reconstruir la precipitación, que determina 75% de su variabilidad. La reconstrucción señala etapas secas severas para los períodos 1785-1815, 1853-1882, 1951-1963 y 1970-1985. De igual manera, para los intervalos 1737-1747, 1824-1852 y 1935-1948 se detectó alta precipitación. En general, se observan periódicas cada inicio o finales de siglo (1700, 1800, 1900 y 2000) y cada mitad de siglo (1750, 1850 y 1950). Mediante un análisis de Coherencia de Ondeleta Cruzada se concluyó que el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) ha influido de manera significativa ( $p < 0.001$ ) en la variabilidad climática de la región, particularmente para los períodos 1905-1930 y 1974-1988.

**Palabras clave:** Coherencia de Ondeleta Cruzada, dendrocronología, ENSO, *Pseudotsuga menziesii*, reconstrucción de precipitación, sequía.

### ABSTRACT

In Sierra de Arteaga, Coahuila, Mexico, five Douglas-fir chronologies of earlywood, latewood and total ring width were developed from five mountain ranges (La Viga, El Coahuilón, El Tarillal, Los Pilares, and El Morro). To determine a common response for the chronologies a Principal Component Analysis was used. The first Eigenvalue (PC1) explained 72% ( $p < 0.001$ ) of the variance. The El Morro chronology showed the lowest correlation and was discarded from further analysis. A regional chronology was developed with the remaining chronologies, extending for the last 302 years (1700 to 2001). The Response Function Analysis indicated that the earlywood and latewood chronologies responded to the seasonal winter-spring precipitation, explaining 75 and 50% of the variance, respectively, therefore, the earlywood chronology was used as the independent variable for a seasonal precipitation reconstruction. Drought episodes were detected in the reconstruction for the periods 1785-1815, 1853-1882, 1951-1963, and 1970-1985. Pluvials were less common but were present in the periods 1737-1747, 1824-1852, and 1935-1948. In this reconstruction droughts had a return interval of about 50 years, considering that dry periods occurred near by the end and middle of each century (1700, 1750, 1800, 1850, 1900, 1950, and 2000). A Coherence Wavelet Analysis involving the regional earlywood series and Tropical Rainfall Index annual values (TRI) indicated that the El Niño Southern Oscillation (ENSO) has significantly influenced the climate variability of this region, particularly for the periods 1905-1930 and 1974-1988.

**Key words:** Coherence Wavelet Analysis, dendrochronology, ENSO, *Pseudotsuga menziesii*, precipitation reconstruction, drought.

Fecha de recepción: 13 de enero de 2009

Fecha de aceptación: 28 de febrero de 2011

<sup>1</sup> CENID-RASPA INIFAP. Correo-e: cerano,julian@inifap.gob.mx

<sup>2</sup> Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo.

<sup>3</sup> Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques templados de las Sierras Madre Occidental y Madre Oriental tienen entre sus componentes especies arbóreas de coníferas con excelente potencial dendrocronológico. La formación de madera temprana y tardía en sus anillos de crecimiento permite discriminar las condiciones climáticas dominantes durante la época fría y cálida, respectivamente, condiciones que a su vez son moduladas por patrones atmosféricos de circulación global (Stahle et al., 1998).

Los registros disponibles para analizar las variaciones climáticas son muy reducidos; en el mejor de los casos sólo se tiene información para los últimos 70 años, que por su calidad y representatividad limita cualquier intento por conocer el comportamiento climático en un intervalo más prolongado.

Los anillos de crecimiento de especies arbóreas con bandas bien diferenciadas, en términos de madera temprana y tardía, son una herramienta para el análisis de las condiciones climáticas en períodos sin registros (Fritts, 1976). El conocimiento de la variabilidad hidroclimática en el tiempo es un elemento esencial para realizar el desarrollo de una planeación adecuada de los recursos hidrológicos, particularmente en aquellas regiones donde el agua es limitante. En el estado de Coahuila, y en general en el noreste de México, la disponibilidad de ese líquido vital para diferentes usos, inclusive para consumo humano, se ha reducido en los últimos años, como resultado de un incremento poblacional e industrial acelerado. Así, en ciudades como Saltillo y Monterrey, en ambos casos con su área metropolitana, su escasez es cada vez más fuerte. Estudios de este tipo pueden contribuir a poner en práctica acciones conducentes a mejorar su manejo.

Las reconstrucciones paleoclimáticas en Estados Unidos son comunes, y en México, recientemente, se han iniciado. La generación de cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra de Arteaga constituyen una base de datos de alta resolución con gran importancia para reconstruir información histórica del clima en los últimos siglos; ello permitirá analizar la frecuencia de eventos hidroclimáticos extremos y sus posibles causas e impactos sociales. Conocer dichas tendencias es importante para incorporarlas a los modelos de predicción correspondientes a la disponibilidad de agua en diversos escenarios climáticos.

El objetivo del presente trabajo fue hacer una reconstrucción de la precipitación en el período invierno-primavera para el sureste de Coahuila, con base en series de tiempo dendrocronológicas de *Pseudotsuga menziesii* que crecieron en rodales de bosque mixto ubicados en la Sierra de Arteaga, Coahuila. Además de, analizar el efecto del fenómeno del Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en

## INTRODUCTION

Mild-weather forests of Sierra Madre Occidental and Sierra Madre Oriental have, among its integral parts, coniferous tree species with extraordinary dendrochronological potential. Earlywood and latewood formation in their growth rings makes it possible to discriminate dominant climatic conditions during the cold and warm season, conditions that are modeled by atmospheric patterns of global circulation (Stahle et al., 1998).

The available records to analyze the climatic variations are very small; in the best of cases, only information of the last 70 years, for their quality and representation, limit any intent to know the climatic behavior in a longer interval.

Growth rings of tree species with well-differenced bands, in terms of early and latewood, are a helpful tool for the analysis of climatic conditions during times without record (Fritts, 1976). To know the hydroclimatic variability along time is an essential element to plan the right development of hydraulic resources, particularly in those regions where water is limited. In Coahuila State and in Northeastern Mexico, in general, this element has been reduced in the last years, as a result of the population and accelerated industrial increment. Thus, in cities like Saltillo and Monterrey, both with their suburban territory, water shortening is clearly more severe. Studies of this kind can help to put into practice ways to improve their management.

Paleoclimatic reconstructions in the United States of America are very common and in Mexico they have been recently started. *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco chronologies of Sierra de Arteaga make up a very valuable high-resolution data base to reconstruct historic information of weather in the last centuries; this will make it possible to analyze the frequency of hydroclimatic extreme events and their possible cause and social impacts. To know such tendencies is important to include them into the predictive models about water availability in diverse climatic scenes.

The aim of the actual paper was to develop a precipitation reconstruction in the Winter-Spring period for Southeastern Coahuila State, based upon dendrochronological time series of *Pseudotsuga menziesii* that grew on mixed-forest stands located at Sierra de Arteaga. Also, to analyze the effect of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on the historic hydroclimatic variability of the region. Work hypothesis is that tree-rings of *Pseudotsuga menziesii* are a proxy of the hydroclimatic variability that has been proper to Sierra de Arteaga and Saltillo city and its suburban area in the last 300 years.

la variabilidad hidroclimática histórica de la región. La hipótesis del trabajo es que los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* constituyen un "proxy" de la variabilidad hidroclimática que ha caracterizado, en los últimos 300 años, a la Sierra de Arteaga, y a Saltillo con su área conurbada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Los sitios de trabajo se localizaron en la Sierra de Arteaga, en el municipio de Arteaga, Coahuila. Esta es parte de la Sierra Madre Oriental, en cuyo macizo montañoso se obtuvieron muestras (virutas y secciones transversales) de *Pseudotsuga menziesii* en las montañas: El Tarillal (25° 26' 40" N, 100° 33' 08" W, 1810 msnm), Los Pilares (25° 16' 50" N, 100° 29' 53" W, 2600 msnm), Sierra La Viga (25° 14' 30" N, 100° 22' 29" W, 3400 msnm), Sierra El Coahuilón (23° 15' 30" N, 103° 55' 08" W, 3200 msnm) y El Morro (25° 12' 06" N, 100° 21' 32" W, 3150 msnm) (Figura 1).

El clima del área es templado subhúmedo, con lluvias escasas todo el año y una precipitación anual entre 450 a más de 500 mm. El porcentaje de lluvia invernal con respecto al anual es relativamente alto; sin embargo, la mayor cantidad se registra en el verano. La temperatura media anual es de 13°C. La media mensual más elevada (mayo y junio) rebasa apenas 16°C, y la más baja, que se presenta en enero alcanza 9°C (INEGI, 1983).

### Trabajo de campo

Se tomaron muestras de incrementos (virutas) de arbolado vivo con taladro de Pressler® y secciones transversales de arbolado muerto con apoyo de motosierra (modelo y marca). Se colectaron 245 muestras de 147 árboles en las diferentes montañas. El número de muestras para cada uno de los sitios fue de: El Tarillal (33), Los Pilares (39), La Viga (68), El Coahuilón (74) y El Morro (31). El material se preparó y dató mediante técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968; Swetnam et al., 1985).

Una vez datadas las muestras, las bandas de crecimiento (anillo anual) se midieron individualmente con un sistema VELMEX con fase deslizable conectado a una computadora, el cual genera mediciones con una precisión de 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980). De esta manera se generaron tres bases de datos: anillo total, madera temprana y madera tardía.

El cofechado, calidad de la respuesta climática, fechado y exactitud de la medición de cada anillo se verificaron con el programa COFECHA, que correlaciona períodos de 50 años con traslape entre lapsos de 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Las tendencias biológicas (competencia, supresión, liberación) y geométricas (incremento

## MATERIALS AND METHODS

### Study Area

Work sites were located in Sierra de Arteaga, Arteaga municipality, Coahuila State, which belongs to the Sierra Madre Oriental; here samples were taken (cores and cross-sections) of *Pseudotsuga menziesii* from the following mountains ranges: El Tarillal (25° 26' 40" N, 100° 33' 08" W, 1810 msnm), Los Pilares (25° 16' 50" N, 100° 29' 53" W, 2600 msnm), Sierra La Viga (25° 14' 30" N, 100° 22' 29" W, 3400 msnm), Sierra El Coahuilón (23° 15' 30" N, 103° 55' 08" W, 3200 msnm) and El Morro (25° 12' 06" N, 100° 21' 32" W, 3150 msnm) (Figure 1).

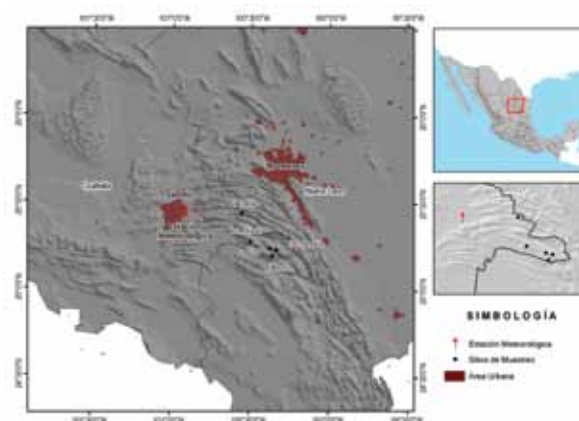


Figura 1. Localización geográfica de las montañas de estudio en Sierra de Arteaga, Coahuila, y la estación climática en la que se obtuvieron los datos meteorológicos, para el desarrollo de los análisis dendrocronológicos.

Figure 1. Geographic location of the studied mountains in Sierra de Arteaga, Coahuila State and the climate station from which were obtained meteorological data, for the development of dendroclimatic analysis.

The local area has a subhumid temperate climate, with scarce rain all year long and an annual precipitation between 450 and >500 mm. The winter rain per cent in regard to summer. The average annual temperature is 13°C. The highest average monthly temperature (May and June) barely exceeds 16°C, and the lowest, that occurs in January, gets to 9°C.

### Field work

Increment samples (cores) were taken from live trees with a Pressler® borer and transverse sections from dead trees with the aid of a chainsaw. 245 samples were collected from 147 trees in the different mountains. The number of samples

en el área de fuste con la edad) no relacionadas con el clima se removieron con el programa ARSTAN (Cook, 1984), al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y luego dividir cada valor anual medido entre el obtenido de la curva (Figura 2). Lo anterior creó una serie de índices normalizados (cronologías) con media de 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987).

for each site was as follows: El Tarillal (33), Los Pilares (39), La Viga (68), El Coahuilón (74) and El Morro (31). The materials were prepared and dated through standard dendrochronological techniques (Stokes and Smiley, 1968; Swetnam et al., 1985).

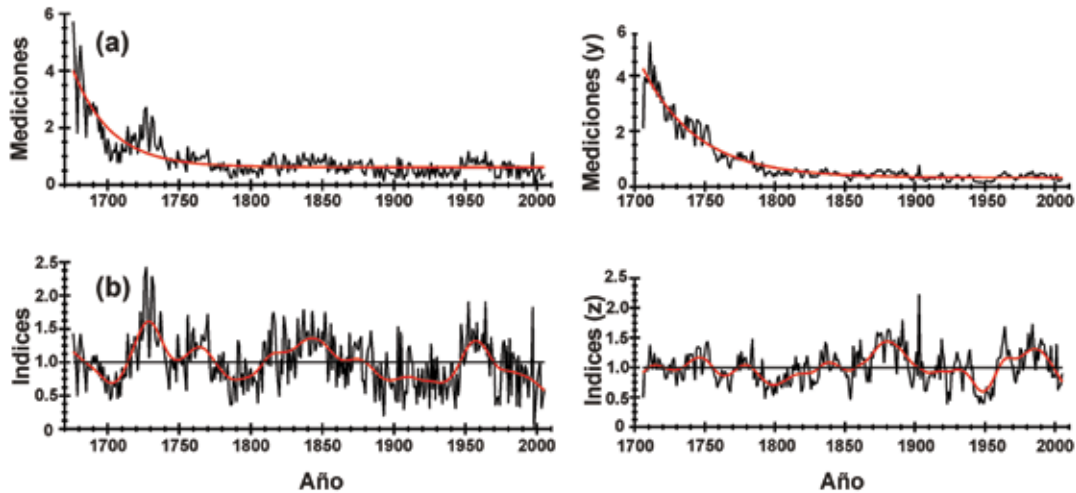


Figura 2. Normalización de series de tiempo: a) Ancho de anillo, caída exponencial en crecimiento por efecto de la edad, b) Generación de índices normalizados, series de tiempo (cronologías).

Figure 2. Time series normalization: a) Ring width, exponential fall in growth by age effects, b) Generation of normalized indexes (chronologies)

El programa ARSTAN origina tres cronologías denominadas: Estándar, Residual y Arstan. Para los análisis se empleó la residual, utilizada para reconstrucciones climáticas, ya que su proceso de generación elimina la autocorrelación (Fritts, 1976). Posteriormente, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) para determinar el porcentaje de variabilidad común entre las cronologías, que permitan decidir con bases técnicas, entre integrar una cronología regional o trabajar con series individuales. La definición de la variable climática y el intervalo de tiempo de su mayor influencia en el crecimiento del arbolado se obtuvieron al procesar una función de respuesta, la cual resultó de un análisis de correlación y se verificó con el programa PRECON (Fritts, 1976), que usa los datos de precipitación y temperatura, en este caso de la estación climática ubicada en el municipio de Saltillo, Coahuila.

One the samples were dated, growth bands (annual ring) were measured in a single way with a VELMEX system with sliding phase connected to a computer, which produces measurements with a 0.001 mm precision (Robinson and Evans, 1980). In this way were three data basis produced: total ring, earlywood and latewood.

Con la respuesta climática conocida se procedió a generar una ecuación de transferencia entre los datos observados y el índice de anillo; para ello se empleó el programa STATISTICA Kernel release 5.5 (Stat Soft Inc., 2000). Con dicho modelo se reconstruyó la precipitación para el periodo común de los datos observados y con la subrutina VERIFY5 del paquete de Programas Dendrocronológico de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés) se hicieron

Co-dating, climatic response quality, dating and measuring exactitude of each ring were confirmed by means of the COFECHA program that correlates 50 year-periods with overlaps of 25 year- periods (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). The biological tendencies (competence, suppression and liberation) and geometric (increment in the stem area with age) no relations with climate were removed with the ARSTAN program (Cook, 1984), by inserting a negative exponential curve or straight line to the measurement series and then by dividing each annual value determined by that obtained from the curve (Figure 2). The former created a series of normalized index (chronologies) with a 1.0 average and a homogeneous variance (Cook, 1987).

The ARSTAN program creates three chronologies: Standard, Residual and Arstan. The second one was used for analysis, which is used for climatic reconstructions, since its generating process eliminates autocorrelation (Fritts, 1976). Then, a Principal

pruebas estadísticas de calibración y verificación. A la mitad de los datos climáticos observados y reconstruidos se aplicó una prueba de calibración, y con la mitad restante se corrió una de verificación (Fritts, 1991). Finalmente, se validó la ecuación de transferencia para el período total de datos de precipitación disponibles, la cual se utilizó para la reconstrucción de la precipitación en la longitud total de la cronología.

A la serie de alta frecuencia (resolución anual) le fue ajustada una curva decenal flexible (baja frecuencia) para resaltar los periodos secos o húmedos presentes en la reconstrucción (Cook y Peters, 1981). Las etapas de sequía detectadas en la reconstrucción se validaron con documentos históricos y estudios dendrocronológicos procedentes de la región norte de México.

El análisis del impacto del fenómeno atmosférico circulatorio ENSO en la variabilidad hidroclimática de la región se llevó a cabo a partir de la relación de los índices generados y el Índice de Lluvia Tropical (TRI, por sus siglas en inglés), el cual constituye un estimativo de la variabilidad del ENSO, con el programa MATLAB 6.5. Para tal efecto se utilizaron gráficos de resolución anual y sus espectros potenciales de ondeleta.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se produjeron cinco cronologías de madera temprana, madera tardía y ancho de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* para las montañas La Viga, El Coahuilón, Los Pilares, El Tarillal y El Morro. Para conocer si las series dendrocronológicas presentaban una misma variabilidad o eran afectadas por fenómenos climáticos comunes se empleó un análisis de componentes principales (PCA). De acuerdo con el PCA, las cinco cronologías presentaron correlaciones altamente significativas ( $p < 0.0001$ ). El componente principal 1 (PC1), que comprende las cinco cronologías, explicó 72% de la variabilidad, con valores de varianza explicada de 0.91, 0.84, 0.88, 0.83 y 0.78, respectivamente (Figura 3). Aunque las cinco montañas tienen una misma variabilidad, se observó una baja correlación con la cronología de El Morro, por lo que se optó por trabajar con una cronología regional compuesta sólo por las correspondientes a las montañas La Viga, El Coahuilón, Los Pilares y El Tarillal.

Se logró fechar los anillos de crecimiento al año exacto de su formación de 206 núcleos de crecimiento o virutas procedentes de 123 árboles; además se obtuvo una cronología de 302 años que comprende el periodo de 1700 a 2001. La cronología regional de madera temprana tuvo un perfecto fechado y una alta correlación entre series ( $r = 0.71$ ).

Se desarrolló una función de respuesta entre la madera temprana, tardía y la precipitación y temperatura a partir de

Component Analysis (PCA) was made to determine the common variability per cent among chronologies, that make it possible to decide with a technical support, whether to integrate a regional chronology or to work with individual series. The definition of the climatic variable and the time interval of greatest influence upon tree growth were obtained while processing a response function, which was the result of a correlation analysis and was confirmed by the PRECON program (Fritts, 1976), that used precipitation and temperature data, in this case, from the climatic station located in Saltillo municipality, Coahuila State.

After knowing the climatic response, followed the generation of a transference equation from the observed data and the ring index, which demanded the STATISTICA Kernel release 5.5 program (Stat Soft Inc., 2000). With such model was reconstructed the precipitation of the common period of the observed data, and with the VERYFY5 sub-routine of the Dendrochronologic Programs of the University of Arizona (DPL) were made calibration and verification statistical tests. At the middle of the observed and reconstructed climatic data was applied a calibration test, and with the other half, a verification was applied (Fritts, 1991). Finally, the transference equation for the total period of available precipitation data was validated, which was used for the reconstruction of the precipitation in the total length of the chronology.

A decennial flexible curve was adjusted to the high frequency series (annual resolution) (low frequency) to outstand the dry or wet periods present in the reconstruction (Cook and Peters, 1981). The drought stages detected in the reconstruction were validated with historic documents and dendrochronological studies from the Northern region of Mexico.

The analysis of the impact of the circulatory atmospheric phenomenon ENSO in hydroclimatic variability of the region was carried out from the relation of the generated indexes and the Tropical Rain Index (TRI), which is an estimation of the ENSO variability, with the MATLAB 6.5 program. For that ending, graphics of the annual resolution and their potential wavelet spectra were used.

## RESULTS Y DISCUSSION

Five chronologies of earlywood, latewood and total tree-ring width of *Pseudotsuga menziesii* were produced for the La Viga, El Coahuilón, Los Pilares, El Tarillal and El Morro mountains.

In order to know if the dendrochronologic series showed the same variability or were affected by common climatic phenomena, a Principal Analysis Component (PCA) was used. According to it, the five chronologies had very significant ( $p < 0.0001$ ) correlations. Principal Component 1 (PC1), that includes the five chronologies, explained 72% of the

los registros de la estación meteorológica Saltillo (25° 26' 08" N y 100° 54' 12" W, datos de 1950 - 1999) con ella se determinó la variable climática de mayor influencia en el crecimiento de *P. menziesii*.

La función de respuesta involucró 14 meses de precipitación, de julio del año previo hasta agosto del año actual de crecimiento. Dicho análisis se fundamenta en que el crecimiento del árbol algunas veces está regulado por las condiciones climáticas prevalecientes uno o dos años antes de la estación de crecimiento. Si se obtiene un coeficiente significativo del análisis, se verifica una relación directa entre la variable climática o crecimiento previo con el ancho del anillo; mientras que, un coeficiente negativo indica una relación inversa. Las letras o ceros en la parte superior de la gráfica señalan un nivel de significancia del 95% ( $p < 0.05$ ) (figuras 4 y 5).

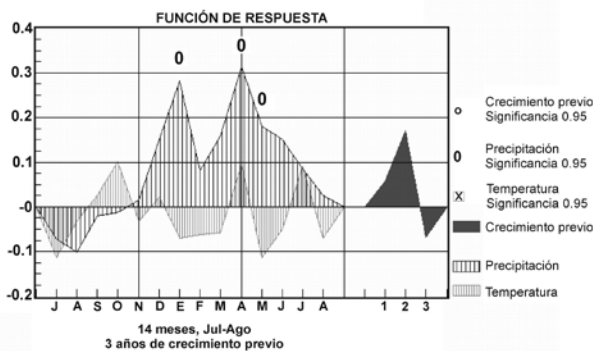


Figura 4. Función de respuesta de la cronología regional de madera temprana con las variables de precipitación y temperatura.

Figure 4. Response function of the earlywood regional chronology with precipitation and temperature variables.

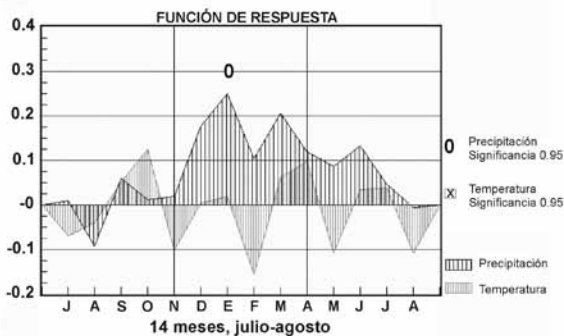


Figura 5. Función de respuesta de la cronología regional de madera tardía con las variables de precipitación y temperatura.

Figure 5. Response function of the latewood regional chronology with precipitation and temperature variables.

variation, with explained variance of 0.91, 0.84, 0.88, 0.83 and 0.78 (Figure 3). Even though the five mountains have the same variability, a low correlation was observed with the El Morro, which induced to work with a compound regional chronology just for the corresponding to the La Vega, El Coahuilón, Los Pilares and El Tarillal mountains.

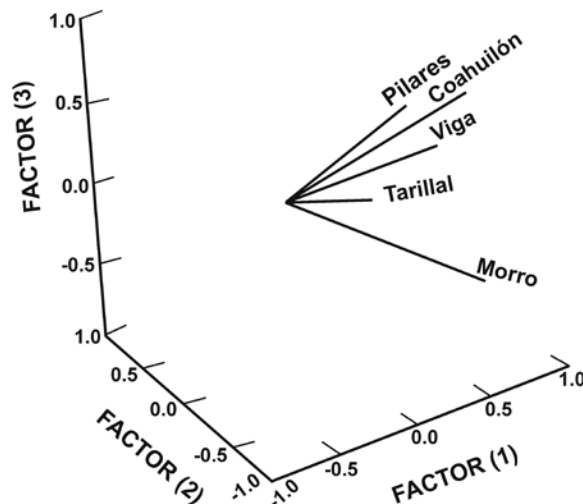


Figura 3. Análisis de Componentes Principales que indica una mayor variabilidad para las cronologías Pilares, Coahuilón, Vega y Tarillal, aunque ambas series de tiempo caen en el CPI, la cronología El Morro muestra una amplitud más grande, lo que explica una menor variabilidad.

Figure 3. Principal Component Analysis that shows a greater variability for the Pilares, Coahuilón, Vega and El Tarillal chronologies, even if both time series fall in the CPI; the El Morro chronology shows a greater aptitude, which explains the minor variability.

206 growth rings could be dated at the exact year of their formation from 123 trees; also, a 302 years chronology could be determined from the 1700 to 2001 period. The regional earlywood chronology had a perfect dating and a high correlation between series ( $r=0.71$ ).

A response function among earlywood, latewood and precipitation and temperature from the records of Saltillo meteorological station (25°26' 08" N y 100° 54' 12" W, data from 1950 to 1999) was developed; with it was determined the climatic variable of greatest influence in *P. menziesii* growth.

The response function involved 14 rainy months, from July of the previous year to August of the present growth year. Such

El análisis de función de respuesta evidencia que la variable con mayor influencia en el crecimiento fue la precipitación. Los meses individuales de enero, abril y mayo presentaron una correlación significativa ( $p < 0.05$ ) de la cronología regional de madera temprana con la variable precipitación (Figura 4); sin embargo, se determinó que de enero-junio, estación invierno-primavera, es el periodo con más influencia en el crecimiento del arbolado ( $r = 0.77$ ,  $p < 0.0001$ ) (Figura 6). Para la cronología regional de madera tardía se obtuvo la misma respuesta (Figura 5). Dado que la madera tardía sólo explica 50% de la variabilidad en precipitación para el periodo evaluado, se optó por trabajar con la madera temprana, que explica 75% de la variabilidad, para reconstruir la precipitación.

La temperatura aunque no influye de manera significativa en el crecimiento ( $p > 0.05$ ), para los meses de abril y julio se estimaron correlaciones positivas para el caso de la madera temprana; en la madera tardía incide positivamente en los meses de marzo, abril, junio y julio.

La falta de una asociación significativa entre el crecimiento de la madera tardía y la precipitación de verano se puede atribuir al hecho de que la mayor cantidad de lluvias se presenta cuando, prácticamente, ha cesado la división celular en el árbol. Además, en muchas ocasiones la cantidad de agua supera la capacidad de infiltración del suelo y escurre como flujo superficial (García, 1997a).

En la región de Saltillo, durante el verano se registra 50% de la precipitación total anual; sin embargo, la de invierno representa un alto porcentaje de la cantidad total, el periodo reconstruido enero-junio constituye 36% de la precipitación total anual y 75% de la de verano, lo que demuestra la gran importancia de la lluvia de invierno-primavera (enero-junio) (ERIC II, 2000) en el crecimiento del arbolado; que se explica, porque las bajas temperaturas en esta época reducen la evaporación, y por otro lado, las lluvias tienden a ocurrir en lapsos de tiempo más prolongados, de tal manera que el suelo se mantiene con mayor humedad.

La respuesta del crecimiento de la madera temprana a la precipitación invernal en la región norte de México y suroeste de Estados Unidos de América se ha discutido ampliamente en diversos estudios paleoclimáticos (Michaelsen, 1989; Stahle y Cleaveland, 1993; Stahle *et al.*, 1999; Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Pohl *et al.*, 2003; Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Cerano, 2008).

### Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera

Al relacionar la cronología regional de madera temprana con la precipitación de enero-junio para el intervalo de tiempo 1953-2000 (periodo con mayor asociación entre las variables) se obtuvo una correlación de 0.77 ( $p < 0.0001$ ) (figuras 6 y 7).

analysis was based on the fact that some times, tree growth is regulated by the climatic conditions that prevail one or two years before the growing season. If a significant analysis coefficient is obtained, a direct relation between the climatic variable or previous growth with the ring width is confirmed; thus, a negative coefficient implies an inverse relationship. Letters or zeroes in the upper part of the graphic mean a 95% significance level ( $p < 0.05$ ) (figures 4 and 5).

The response function analysis revealed that the variable with greatest influence upon growth was precipitation. January, April and May as single months showed a significant correlation ( $p < 0.05$ ) of the earlywood regional chronology with the precipitation variable (Figure 4); however, it was determined that the January-June, winter-spring season, is the period with stronger influence on tree-growth ( $r = 0.77$ ,  $p < 0.0001$ ) (Figure 6). The same response was obtained for the latewood regional chronology (Figure 5). Since latewood only explains 50% of the precipitation variability for the assessed period, earlywood was chosen to work with as it explains 75% of the variability to reconstruct precipitation.

Even though temperature does not affect growth in a significant way ( $p > 0.05$ ), for earlywood positive correlations were estimated for April and July; it affects latewood positively in March, April, June and July.

The absence of a significant association between growth of latewood and precipitation in summer can be attributed to the fact that most rains occur when cell division of the tree has stopped. Besides this, in many occasions the amount of water surpasses the soil infiltration ability and it drains as superficial flux (García, 1978a).

In the Saltillo region, 50% of the total annual precipitation is recorded during summer; however, winter rainfall makes up a high per cent of the total amount. The reconstructed period January-June is 36% of total annual precipitation and 75 % of that of summer, which demonstrates the great importance of winter-spring rain (January-June)(ERICII, 2000) in tree growth, that is explained the low temperatures of that period reduce evaporation, and on the other hand, rains tend to occur in longer times, in such a way that soil keeps moister.

The growth response of earlywood to winter precipitation in the Northern region of Mexico and Southwest of the United States of America has been widely discussed through several paleoclimatic studies (Michaelsen, 1989; Stahle and Cleaveland, 1993; Stahle *et al.*, 1999; Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Pohl *et al.*, 2003; Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Cerano, 2008).

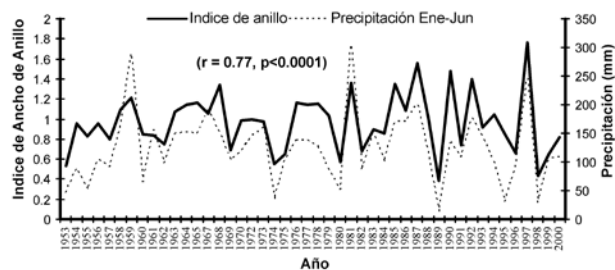


Figura 6. Relación entre la cronología regional de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii* y la precipitación estacional observada enero - junio.

Figure 6. Relation between the regional earlywood chronology of *Pseudotsuga menziesii* and the January-June observed seasonal precipitation.

### Calibración y Verificación

La calibración se realiza con el propósito de examinar la relación entre las dos variables y es medida por el porcentaje de la variación explicada de la variable dependiente (precipitación) por la independiente (índice de madera temprana). La verificación, por su parte, tiene como objetivo la validación de la reconstrucción.

El modelo utilizado para la reconstrucción incluyó el periodo de datos de 1953-2000 y los índices de la cronología regional de madera temprana para el mismo lapso de tiempo. Una vez aplicado el modelo y reconstruida la precipitación, se calibró el modelo con datos del subperiodo 1976-2000 y se verificó en el correspondiente a 1953-1975, mediante la comparación de la precipitación observada y la reconstruida (cuadros 1 y 2).

Cuadro 1. Calibración para la reconstrucción regional de precipitación invierno-primavera (enero-junio).

Table 1. Calibration for the regional reconstruction of the winter-spring precipitation (January-June).

Periodo	R <sup>2</sup>	Coeficientes		Error estándar		Prueba (t)		p	
		a	b	a	b	a	b	a	b
1953-1975	0.55	-56.30	195.50	38.75	40.83	-1.45	4.78	0.162	0.000
1976-2000	0.66	-25.43	150.65	24.09	22.73	-1.05	6.62	0.302	0.000
1953-2000	0.60	-28.48	158.82	19.89	19.68	-1.43	8.06	0.159	0.000

### Winter-spring precipitation reconstruction

When the regional earlywood was related to the January-June precipitation for the 1953 - 2000 time interval (period with the greatest association between the variables), a 0.77 correlation ( $p < 0.0001$ ) was obtained (figures 6 and 7).

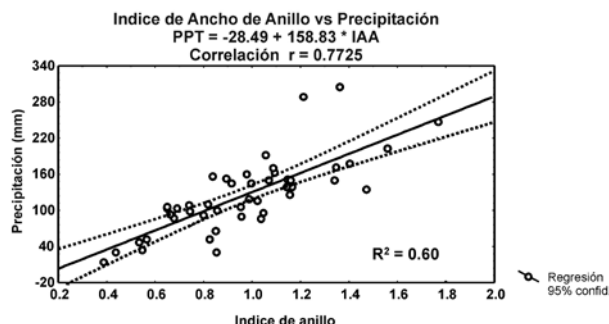


Figura 7. Gráfica de dispersión del modelo de regresión, que muestra la variabilidad de la cronología regional de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii* con la precipitación total enero - junio.

Figure 7. Graphic of dispersion of the regression model that shows the variability of the regional earlywood chronology of *Pseudotsuga menziesii* with the January-June total precipitation.

### Calibration and Verification

Calibration is done with the purpose of examining the relation between the two variables and is measured by the explained variation of the dependent variable (precipitation) by the independent (earlywood index). Verification, on its own, has the objective of validating reconstruction.



Cuadro 2. Pruebas estadísticas de la verificación para la reconstrucción de precipitación invierno-primavera (enero-junio), a partir de la precipitación regional reconstruida y los datos observados.

Table 2. Statistical tests of the verification for the reconstruction of the winter-spring reconstruction (January-June) from the reconstructed regional precipitation and the observed data.

Periodo	Correlación de Pearson (r)	Reducción de error	Valor de t	Prueba de signos	Primera diferencia significativa
1953-1975	0.62*	0.375*	2.100*	3*	7ns
1976-2000	0.81*	0.647*	3.419*	5*	3*
1953-2000	0.74*	0.542*	3.930*	8*	10*

\* = Significativos, p<0.05  
 ns = No Significativos, p<0.05

Los resultados del modelo indican una correlación de  $r = 0.81$  ( $r^2 = 0.66$ ,  $p < 0.0001$ ) entre la precipitación observada y la reconstruida, lo que demuestra 66% de la variabilidad en precipitación para el período de calibración. La verificación presentó una correlación de  $r = 0.62$  y explica 38% ( $r^2 = 0.38$ ,  $p < 0.001$ ) de la variabilidad. El periodo total de precipitación observada y reconstruida muestra una  $r = 0.74$  ( $r^2 = 0.55$ ,  $p < 0.001$ ) (Figura 8).

Dado que los subperiodos con los cuales se realizó tanto la calibración, como la verificación del modelo entre la precipitación observada y la reconstruida mostraron una significativa correlación; se utilizó el periodo total de datos climáticos disponibles (1953-2000) para generar la ecuación de reconstrucción que tuvo una  $r = 0.74$  ( $r^2 = 0.55$ ,  $p < 0.0001$ ) (Cuadro 2).

La subrutina VERIFY5 del DPL indicó que tanto la calibración como la verificación pasaron la prueba de significancia ( $p < 0.05$ ) para la correlación, reducción de error, valor de "t" y primera diferencia significativa. El modelo de regresión obtenido para el período 1953-2000 se consideró estadísticamente válido para reconstruir el período total de la serie dendrocronológica (Cuadro 1).

El modelo bivariado utilizado fue el siguiente:

$$Y_t = -28.470 + 158.8293 * X_t$$

Donde:

$Y_t$  = Valor de la precipitación (mm) reconstruida enero-junio para un año específico.

$X_t$  = Índice de madera temprana.

### Variabilidad climática reconstruida

La reconstrucción de 302 años que comprende de 1700-2001 presenta una alta variabilidad interanual y multianual, que

The model used for reconstruction included the 1953 - 2000 data period and the earlywood regional chronology indexes for the same time interval. One the model was applied and precipitation reconstructed, the model was calibrated with the 1976 - 2000 data period and was verified in the corresponding 1953 - 1975, through the comparison between the observed and the reconstructed precipitation (Tables 1 and 2).

The results of the model show a correlation of  $r = 0.81$  ( $r^2 = 0.66$ ,  $p < 0.0001$ ) between the observed and the reconstructed precipitation, which proves 66% of the variability of precipitation for the calibration period. Verification had a correlation of  $r = 0.62$  and explains 38% ( $r^2 = 0.38$ ,  $p < 0.001$ ) of variability. The total period of observed and reconstructed precipitation shows an  $r = 0.74$  ( $r^2 = 0.55$ ,  $p < 0.001$ ) (Figure 8).

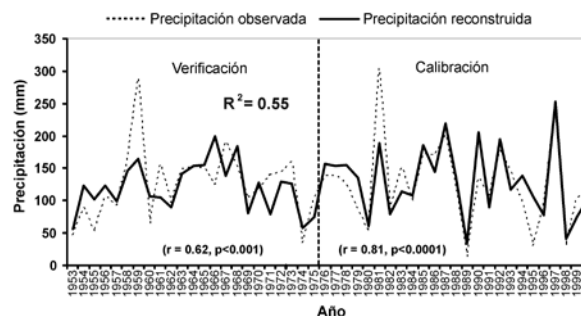


Figura 8. Comparación de series de tiempo de precipitación observada y precipitación reconstruida invierno-primavera para el período estacional enero-junio (1953-2000).

Figure 8. Time series comparison of the Winter-spring observed and reconstructed precipitation for the seasonal January-June period (1953 - 2000).

caracteriza la precipitación invierno-primavera para el área de estudio (Figura 9). La media de la reconstrucción fue de 129.0 mm con una desviación estándar de 42.5 mm. Se ajustó a la reconstrucción una curva decenal flexible para enfatizar eventos de baja frecuencia por década.

Se reconstruyeron importantes sequías para los periodos 1703-1718, 1726-1736, 1748-1755, 1785-1815, 1853-1882, 1890-1902, 1916-1933, 1951-1963, 1970-1985 y de 1994 en adelante. Por su amplitud sobresalieron los periodos 1785-1815, 1853-1882, 1951-1963 y 1970-1985. De igual manera se reconstruyeron precipitaciones sobresalientes en: 1737-1747, 1756-1784, 1824-1852, 1935-1948, 1964-1969 y 1986-1994. Algunos de los eventos húmedos de mayor duración e intensidad ocurrieron de 1737-1747, 1824-1852 y 1935-1948 (Figura 9).

Los impactos económicos y sociales de las sequías en la región se incrementan en intensidad, extensión y duración por la alta demanda de agua de la industria, la agricultura y de la población, que en las últimas décadas ha presentado un crecimiento acelerado (Allanach y Johnson-Richards, 1995).

Con reconstrucciones de precipitación previas para el norte de México se ha detectado una sincronía de estos eventos secos (Díaz et al., 2002; Cleaveland et al., 2003; Pohl et al., 2003; Villanueva-Díaz et al., 2009; Cerano et al., 2009), particularmente en las décadas de 1950 y 1970. En el siglo XIX algunas de ellas mostraron severas sequías en las de 1810, 1870 y 1890. En el siglo XVIII también se detectaron en las correspondientes a: 1710, 1730, 1750 y 1790, muchas de ellas ocasionaron escasez de alimentos y epidemias, a finales del siglo XVIII y principios del XIX, pero especialmente a mediados del último (Florescano, 1980; García, 1997b).

Durante la segunda mitad del siglo XIX, de 1853-1882, ningún año registró una precipitación por arriba del promedio para el periodo invierno-primavera. En diversos estudios se reconstruyen etapas con severa carencia de agua (Stahle et al., 1998 y 1999; Díaz et al., 2002; Cleaveland et al., 2003) en regiones de Texas, EUA, así como en los estados de Chihuahua y Durango. Ellos indican que dicho episodio constituye una de las etapas secas más fuertes que han impactado el norte de México. Finalmente, en una de las reconstrucciones recientes para el estado de Nuevo León se evidencia la ocurrencia de una intensa carencia de agua en el periodo de 1857-1868 (Villanueva-Díaz et al., 2007).

En general, la reconstrucción de la variabilidad de precipitación para los pasados tres siglos en la región sureste de Coahuila señala tendencias o sequías muy cíclicas, cada inicio o finales de siglo (1700, 1800, 1900 y 2000), de hecho la última continúa afectando el norte de México y las sequías se registran cada medio siglo (1750, 1850 y 1950). Estas han sido de altísima intensidad y otras han tenido gran impacto social

Since the sub-periods with which calibration as well as the verification of the model between the observed and the reconstructed precipitation was made, showed a significant correlation, the available climatic data for the total period (1953 - 2000) were used to generate the reconstruction equation that had an  $r = 0.74$  ( $r^2 = 0.55$ ,  $p < 0.0001$ ) (Table 2).

The VERIFY5 sub-routine of the DPL pointed out that calibration and verification passed the test of significance ( $p < 0.05$ ) for correlation, error reduction, "t" value and first significant difference. The regression model for the 1953 - 2000 period was considered statistically valid to reconstruct the whole period of the dendrochronological series (Table 1). The bivariate model was the following:

$$Y_t = -28.470 + 158.8293 * X_t$$

Where:

$Y_t$  = Value of the January-June reconstructed precipitation (mm) for a specific year

$X_t$  = earlywood index

## Reconstructed climatic variability

The 302 years reconstruction that involves from 1700 to 2001 shows an important inter-annual and multiannual variability that describes the winter-spring precipitation for the study area (Figure 9). Reconstruction average was 129.0 mm with a standard deviation of 42.5 mm. Reconstruction was adjusted to a flexible decennial curve to emphasize the low-frequency events per decade.

Important droughts were reconstructed for 1703 - 1718, 1726 - 1736, 1748 - 1755, 1785 - 1815, 1853 - 1882, 1890 - 1902, 1916 - 1933, 1951 - 1963, 1970 - 1985 and from 1994 onwards. For their width, the 1785 - 1815, 1853 - 1882, 1951 - 1963 and 1970 - 1985 periods were outstanding. In the same way, prominent precipitations were reconstructed for 1737 - 1747, 1756 - 1784, 1824 - 1852, 1935 - 1948, 1964 - 1969 and 1986 - 1994. Some longer humid or wet events of great intensity occurred in 1737 - 1747, 1824 - 1852 and 1935 - 1948 (Figure 9).

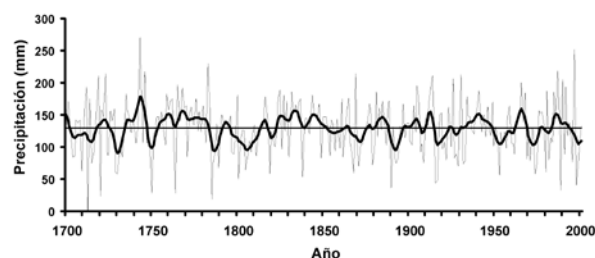
The economic and social impacts of droughts in the region water demand of industry, agriculture and population, which has exhibited an accelerated growth in the last decades (Allanach and Johnson-Richards, 1995).

With previous precipitation reconstructions for the North of Mexico it has been detected a synchrony of these dry events (Díaz et al., 2002; Cleaveland et al., 2003; Pohl et al., 2003; Villanueva-Díaz et al., 2009; Cerano et al., 2009), particularly in the 1950 and 1970 decades. During the XIX century, some of them showed severe droughts in

y económico, como las más recientes del siglo XIX y XX (1853-1882 y 1951-1963). De seguir dicha tendencia es probable que en esa parte del territorio nacional se presenten fuertes sequías a mediados y finales del siglo XXI, aunque pudiesen manifestarse con frecuencias mayores, si se considera el calentamiento acelerado del planeta, por la influencia del ser humano.

### Comparación de eventos de baja frecuencia entre reconstrucciones de precipitación invernal para el norte de México

La comparación de los episodios de baja frecuencia entre la reconstrucción para la región sureste de Coahuila y las de precipitación que cubren las estaciones de invierno y primavera para el período común de 1782 a 1992 indicaron correlaciones altamente significativas ( $p < 0.01$ ) (Cuadro 3).



The grey color line stands for the annual variability; the dark horizontal line the mean, and the flexible (bold) line, decennial events.

Figura 9. Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera para el sureste de Coahuila.  
Figure 9. Reconstruction of the winter-spring precipitation for Southeastern Coahuila State.

Cuadro 3. Correlación entre reconstrucciones de precipitación invierno-primavera para el norte de México y la reconstrucción generada para el sureste de Coahuila y el periodo común 1782-1992.

Table 3. Correlation between reconstructions of the winter-spring precipitation for the North of Mexico and the reconstruction for Southeast Coahuila and the 1782 - 1992 common period.

Reconstrucciones de lluvia invernal	ppt. ene-jun Saltillo, Coahuila	ppt. nov-abril Chihuahua (Díaz et al., 2002).	ppt. oct-mayo Bisaloachi, Chihuahua (Villa Nueva et al., 2009)	ppt. nov-marzo Durango (Cleaveland et al., 2003)	ppt. ene-junio Saltillo (Pohl et al., 2003).	ppt. dic-abril Nevada, Nuevo León (Villanueva-Díaz et al., 2007)
ppt. ene-jun Saltillo, Coahuila	1					
ppt. nov-abril Chihuahua (Díaz et al., 2002).	0.46***	1				
ppt. oct-mayo Bisaloachi, Chihuahua (Villa Nueva et al., 2009)	0.37***	0.79**	1			
ppt. nov-marzo Durango (Cleaveland et al., 2003)	0.57***	0.78**	0.65***	1		
ppt. ene-junio Saltillo (Pohl et al., 2003).	0.71**	0.43***	0.38***	0.56***	1	
ppt. dic-abril Nevada, Nuevo León (Villanueva-Díaz et al., 2007)	0.56***	0.37***	0.33***	0.51***	0.49***	1

\* Significativo  $p < 0.05$ . \*\* Significativo  $p < 0.01$ . \*\*\* Significativo  $p < 0.001$  ppt = precipitación total

\* Significant  $p < 0.05$ . \*\* Significant  $p < 0.01$ . \*\*\* Significant  $p < 0.001$  ppt = total precipitation

La sincronización de los periodos secos o húmedos a nivel década apunta cierta similitud para las diversas reconstrucciones (Figura 10). La presencia generalizada de sucesos secos y húmedos en determinados períodos cubrió gran parte de la superficie del territorio nacional. De esta manera, las sequías comunes más importantes en las reconstrucciones fueron: 1780, 1800-1810, 1815-1820, 1860, 1870, 1890, 1900-1910, 1950 y 1970. Los eventos húmedos se observaron en las décadas: 1830, 1840, 1880, 1940 y 1960. La similitud o sincronización de los primeros en las diferentes reconstrucciones permite conocer la cobertura de estos fenómenos, seguramente, producidos por patrones circulatorios atmosféricos y que en algunas regiones están documentados en archivos históricos (Florescano, 1980; García, 1997). Varios de los períodos comunes, como los de 1800-1810, 1818-1822, 1855-1865, 1885-1895, 1950-1960 y 1970s estuvieron presentes en las diferentes cronologías y corresponden a sequías que impactaron la República Mexicana, en toda su extensión.

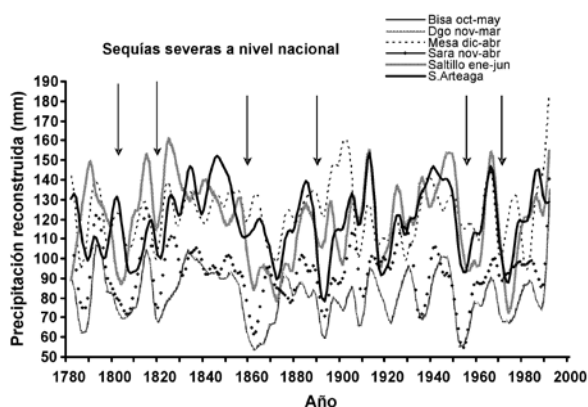


Figura 10. Comparación de la reconstrucción de precipitación invierno-primavera (enero-junio) para el sureste de Coahuila, con relación a eventos de baja frecuencia en reconstrucciones de lluvia invernal para el norte y noreste de México

Figure 10. Comparison of the reconstruction of the winter-spring precipitation (January-June) for Southeastern Coahuila, in regard to low-frequency events present in winter rain reconstructions for the North and Northeast of Mexico.

### Influencia del ENSO en la precipitación invierno-primavera

El Niño es uno de los patrones de circulación atmosférica que afecta el norte de México y da lugar a un incremento en la precipitación invernal, principalmente en su fase cálida (Stahle et al., 1998; Magaña et al., 1999). Sin embargo, la porción noreste del país es menos propensa a ser alterada

1810, 1870 and 1890. In the XVIII century, as well, such was detected for 1710, 1730, 1750 and 1790; most of them caused lack of food and epidemics, at the end of the XVIII century and the beginning of the following, but specially at the middle of the latter (Florescano, 1980; García b, 1997).

During the second half of the XIX century, no year recorded a precipitation above the average for the winter-springtime interval in period from 1853 to 1882. In several studies stages with a severe lack of water were reconstructed (Stahle et al., 1998 and 1999; Díaz et al., 2002; Cleveland et al., 2003) in regions of Texas, USA, as well as in the states of Chihuahua and Durango. They point out that such an episode is one of the driest stages that have affected the North of Mexico. Finally, in one of the recent reconstructions for Nuevo Leon State, there is evidence of the occurrence of an intense lack of water in the 1857-1868 lapse (Villanueva-Díaz et al., 2007).

In general, the reconstruction of precipitation for the last three centuries of the Southeastern part of Coahuila State, indicates tendencies or very cyclic droughts at the beginning or at the end of them (1700, 1800, 1900 and 2000); in fact, the last one keeps influencing the North of Mexico and droughts are recorded each half of the century (1750, 1850 and 1950). They have been of the highest intensity and other have had a great social and economic impact, as the most recent for the XIX and XX centuries (1853 - 1882 y 1951 - 1963). If such tendency keeps the same, it is probable that in that part of the nation strong droughts will appear at the middle and final years of the XXI century, even if they could be present with greater frequency, if the accelerated global heating of the planet is considered, due to human intervention.

### Comparison of low-frequency events between reconstructions of winter precipitation for the North of Mexico

The comparison of low-frequency episodes between the reconstruction for the Southeastern Coahuila and the precipitation of the winter and spring seasons for the common period from 1782 to 1992 showed highly significant correlations ( $p < 0.01$ ) (Table 3).

The synchronization of the dry or wet periods at a decade level indicates some similitude of the different reconstructions (Figure 10). The generalized presence of dry and wet events in determined times covered great part of the surface of the national territory. In this way, the most important regular droughts in the reconstructions were: 1780, 1800 - 1810, 1815 - 1820, 1860, 1870, 1890, 1900 - 1910, 1950 and 1970. The wet events were

por este fenómeno y la lluvia en esa región depende de la presencia de los huracanes que se originan en las estaciones de verano y de otoño, así como de la incursión de masas de aire frío en la estación invernal (Magaña et al., 1999).

La teleconexión extratropical de ENSO en el estado de Coahuila se ilustra con la variabilidad en correlación de la cronología regional y el Índice de Lluvia Tropical (TRI por sus siglas en inglés), el cual es un estimador de la variabilidad del ENSO.

En la Figura 11, la línea negra delgada marca el espacio dentro del nivel de significancia del 5%, es decir, define el cono significativo de influencia. Las manchas de color rojo delimitadas por una línea negra señalan que existe una relación altamente significativa entre ambos fenómenos; mientras que las flechas con posición horizontal hacen referencia a la fase en la que están.

A partir de la coherencia de ondeletas entre la cronología regional Sierra de Arteaga y el TRI se identifican regiones en el dominio de tiempo-frecuencia, donde las dos variables involucradas tienen covarianza importante (Grinsted et al., 2004). En la Figura 11 el lapso de 1905 a 1930 es significativo para un periodo de 3 a 10 años e inclusive, en su mayor parte, ambas variables coinciden en fase (flechas horizontales). Otro intervalo significativo comprende de 1974 a 1988 para una periodicidad que cambia de cinco a siete años; sin embargo, hay un desfase entre los procesos. Los resultados sugieren una posible relación de las variables en las dos regiones, pues son lo suficientemente grandes como para aseverarlo, aunque no implique causalidad (Grinsted et al., 2004).

Las cronologías de Sierra de Arteaga, Coahuila, de las que se derivó la reconstrucción, se ubican en sitios de la Sierra Madre Oriental cuya precipitación invierno-primavera no tiene un componente importante de la influencia del ENSO. En cambio, gran parte de la precipitación en esa región se atribuye a los frentes fríos, así como a las tormentas tropicales y huracanes que se forman en el Golfo de México y que ocurren en verano.

No obstante que la porción noreste del país es menos influenciada por el fenómeno del ENSO en particular la Sierra Madre Oriental, las correlaciones muestran que si tuvo cierto impacto en las condiciones de precipitación en dicha región, en periodos específicos tales como 1905-1930 y 1974-1988. Con respecto a la variabilidad que el ENSO ha presentado en el tiempo es evidente que en las primeras y últimas décadas del siglo XX su impacto fue mayor en la variabilidad climática regional, con una menor o nula incidencia en el periodo 1931 a 1970.

observed in the following decades: 1830, 1840, 1880, 1940 and 1960. The similitude or synchronization of the first ones in the different reconstructions makes it possible to know the extent of these phenomena, most probably produced by the atmospheric circulatory patterns which are supported by documents in historic files at some regions (Florescano, 1980; García, 1997). Some of the common periods, such as 1800 - 1810, 1818 - 1822, 1855-1865, 1885 - 1895, 1950-1960 and 1970 were present in the different chronologies and belong to droughts that impacted Mexico as a whole.

## ENSO influence upon the winter-spring precipitation

El Niño is one of the atmospheric circulatory patterns that affects the North of Mexico and starts an increment of the winter precipitation, mainly of its warm stage (Stahle et al., 1998; Magaña et al., 1999). However, the Northeastern part of the country is less prone to be affected by this phenomenon and rain in this region depends of hurricanes that initiate in the summer and fall and the incursion of cold air masses during the winter season (Magaña et al., 1999).

ENSO extratropical teleconnection in Coahuila State is illustrated with the correlation variability of the regional chronology and the Tropical Rain Index (TRI), which is an estimator of ENSO variability.

In Figure 11 the black thin line marks the space within the 5% significance level, that is, it defines the cone of significant influence. The red color spots limited by a black line point out that there is a very significant relation between both phenomena, while the horizontal arrows refer to the stage in which they are.

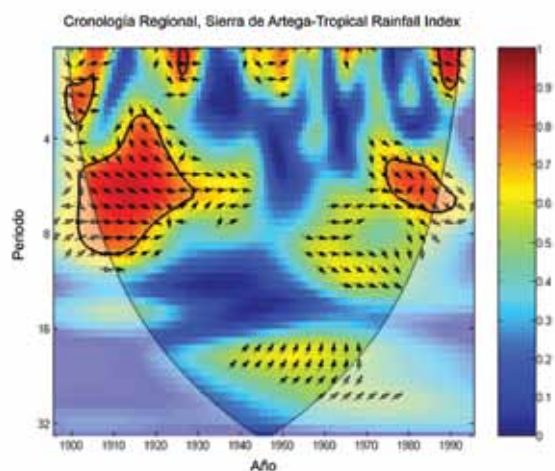


Figura 11. Coherencia anual de ondeleta entre la Cronología Regional de Sierra de Arteaga y el TRI.

Figure 11. Annual wavelet coherence between the Regional Chronology of Sierra de Arteaga and TRI.

## CONCLUSIONES

Las sequías más fuertes reconstruidas para el sureste de Coahuila se presentaron en los períodos 1785-1815, 1853-1882, 1951-1963 y en las décadas de 1970 y 1990. Las más severas tienen una ocurrencia cíclica, en intervalos de cien años como las correspondientes al inicio de 1700, 1800, 1900 y 2000 e igualmente significativas las sequías con una fuerte intensidad a mediados de cada siglo (1750, 1850 y 1950) y otras de gran impacto social y económico, como las de mediados del siglo XX (1950-1965).

Con base en los resultados del presente trabajo y bajo el supuesto de que estas sequías pudieran tener una tendencia similar en el futuro, se esperarían eventos muy intensos a mediados y finales del siglo XXI. Sin embargo, sería drásticamente modificada por las actividades humanas, que en las últimas décadas han provocado un calentamiento acelerado del planeta, y como consecuencia han influenciado patrones de circulación atmosférica global, como El Niño-Oscilación del Sur que ha tenido fuertes variaciones con efectos devastadores.

Las cronologías desarrolladas para la Sierra de Arteaga se ubican en montañas de la Sierra Madre Oriental, cuya precipitación invierno-primavera no tiene un componente muy importante de la influencia de El Niño Oscilación del Sur (ENSO). Las correlaciones estimadas muestran que aunque la porción noreste del país es menos afectada por El Niño, este fenómeno ha tenido influencia en la variabilidad de la precipitación para esta región del país en los periodos 1905-1930 con una frecuencia de 3-10 años, y 1974-1988 de 5-7 años.

El problema de la escasez de agua se ha agravado en los últimos 30 años debido al crecimiento poblacional tan acelerado en el municipio de Saltillo. El impacto de esta reconstrucción tiene especial valor en la planeación del uso y manejo del agua, a partir de lo limitada que está en la región.

El problema de la escasez de agua se ha agravado en los últimos 30 años debido al crecimiento poblacional tan acelerado en el municipio de Saltillo. El impacto de esta reconstrucción tiene especial valor en la planeación del uso y manejo del agua, ya que constituye un recurso muy limitado en la región. 🌧️

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento otorgado por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático (IIAI), a través del proyecto CRN # 2047 Documentación, entendimiento y proyección de los cambios en el ciclo hidrológico en la cordillera americana.

From the wavelet coherence between the regional chronology of Sierra de Arteaga and TRI, there are regions in the time-frequency dominion where the two involved variables have a great co-variance (Grinsted et al., 2004). In Figure 11 the lapse from 1905 to 1930 is significant for a 3 to 10 year period and also, in most of it, both variables coincide in stage (horizontal arrows). Another significant interval includes from 1974 to 1988 for a regular recurrence that changes from 5 to 7 years; however, there is a lag between the processes. Results suggest a probable relation of the variables in both regions, as they are big enough as to state it, even if it does not imply a cause (Grinsted et al., 2004).

The chronologies of Sierra de Arteaga, Coahuila State, from which came the reconstruction, are located in places of Sierra Madre Oriental, whose winter-spring precipitation does not have an important influence of ENSO. In return, a great part of the precipitation in that region is attributed to the cold fronts, as well as to the tropical storms and hurricanes that are formed in the Gulf of Mexico and that occur in summer.


In spite of the fact that the Northeastern portion of the country is less influenced by the ENSO phenomenon, the Sierra Madre Oriental in particular, correlations show that it did have some impact upon the precipitation conditions in such region, in specific periods such as 1905 - 1930 and 1974 - 1988. In regard to the variability that ENSO has presented through time, it is evident that in the first and last decades of the XX century, its impact was greater in the regional climatic variability, with a lower or non-existent incidence in the 1931 to 1970 period.

## CONCLUSIONS

The most severe droughts reconstructed for Southeastern Coahuila occurred in the 1785 - 1815, 1853 - 1882, 1951 - 1963 periods and in the 1970 and 1990 decades. The most intense have a cyclic periodicity, in one hundred-year intervals, such as those at the beginning of 1700, 1800, 1900 and 2000, and very significant as well, severe droughts at the middle of each century (1750, 1850 and 1950) and others with serious social and economic impact, such as those recorded at half of the XX century (1950-1965).

Based upon the results of the actual work and supposing that these droughts might behave in a similar way in the future, very intense events might be expected at half or at the end of the XXI century. However, it would be drastically changed by human activities, that in the last decades have caused an accelerated heating of the planet, and as a consequence, have influenced global atmospheric circulation patterns such as El Niño-South Oscillation, which has had strong variations with devastating effects.

## REFERENCIAS

- Allanach, W. C. and B. Johnson-Richards. 1995. Water infrastructure study Saltillo, Mexico. In: Charbeneau R.J., (editor). Ground Water Management Proceedings, First International Conference on Water Resources Engineering. American Society of Civil Engineers, New York, USA. p. 18-23.
- Cerano, P. J. 2008. Variabilidad climática, regímenes de incendios e influencia de patrones circulatorios para el suroeste de Chihuahua. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango, Méx. 118 p.
- Cerano-Paredes, J., J. Villanueva-Díaz, P. Z. Fulé, J. G. Arreola-Ávila, I. Sánchez-Cohen y R. D. Valdez-Cepeda. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques* 15 (2): 27-44.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Díaz and B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico. *Climatic Change*. 59: 369-388.
- 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.
- Cook, E. R. and R. H. Holmes. 1984. Program ARSTAN and users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ. USA. 15 p.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*. 47:37-59.
- Díaz, S. C., M. T. Therrell, D. W. Stahle and M.K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research*. 22:237-244.
- Florescano, E. M. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos: Com. Plan Hidráulico Nacional. México. D. F. 158 p.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree-rings and Climate*. Academic press. New York. NY. USA. 567 p.
- Fritts, H. C. 1991. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data. University of Arizona Press. Tucson, AZ. USA. 286 p.
- García, E. 1978. Apuntes de climatología. UNAM, México, D. F. 1México. 53 p.
- García, A. V. 1997a. Alternativas ante las sequías de 1789-1810 en la Villa de Saltillo, Coahuila, México. In: Virginia García Acosta, (Coord). *Historia y desastres en América Latina. Vol. II Red de Estudios Sociales en América Latina. México, D. F. México*. 22 p.
- García, A. V. 1997b. Las "sequías" y sus impactos en las sociedades del México decimonónico, 1856-1900. In: Virginia García Acosta, (Coord). *Historia y desastres en América Latina. Vol. II Red de Estudios Sociales en América Latina. México, D. F. México*. 32 p.
- Grinsted, A., J. C. Moore and S. Jevrejeva. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 11: 561-566.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*. 57(2): 205-221.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*. 43: 69-78.
- Instituto Nacional de estadística y Geografía, (INEGI). 1983. Síntesis geográfica de Coahuila. México, D. F. México. 165 p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2000. Extractor Rápido de Información Climatológica II (ERIC). Software. Jiutepec, Mor. México. s/p.
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez. 1999. Los impactos del Niño en México. Editado por V. Magaña. Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D. F. México. 229 p.
- Michaelsen, J. 1989. Long period fluctuations in El Niño amplitude and frequency reconstructed from tree rings. In: Peterson, D. H. (ed). 1989. *Aspects of Climate Variability in the Pacific and the Western Americas*. AGU, Washington, D.C. Geophysical Monograph. 55, p. 69-74.
- The developed chronologies for Sierra de Arteaga are located in the mountains of Sierra Madre Oriental, whose winter-spring precipitation has not a very important component of the El Niño-South Oscillation (ENSO) influence. The estimated correlations show that, even if the Northeast part of the country is less affected by El Niño, this phenomenon has had an effect upon the variability of the precipitation for this region in the 1905-1930 periods with a 3 - 10 year frequency, and 1987 - 1988 with 5 to 7 years.
- The problem of the lack of water has become worse in the last 30 years due to the accelerated population growth in Saltillo municipality. The impact of this reconstruction is particularly valuable in the use and management of water planning as it is a very limited resource in the region. 

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was possible thanks to the financial support provided by the Interamerican Institute for Global Change Research through the CRN # 2047 project "Documentation, understanding and scope of the changes in the hydrologic cycle in the American mountain range".

End of the English version

- Pohl, K., M. D. Therrell, J. S. Blay, N. Ayotte, J. J. Cabrera, S. C. Díaz, E. O. Cornejo, J. A. Elvir, M. E. Gonzalez, D. Opland, J. Park, G. Pederson, S. S. Bernal, L. S. Vazquez, J. Villanueva-Díaz, and D. W. Stahle. 2003. A cool season precipitation reconstruction for Saltillo, Mexico. *Tree-Ring Research*. 59(1) p. 11-19.
- Robinson, W. J. and R. Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*. 40: 59-64.
- Stahle, D. W. and M. K. Cleaveland. 1993. Southern Oscillation extremes reconstructed from tree-rings of the Sierra Madre Occidental and Southern Great Plains. *Climate*. 6: 129-140.
- Stahle, D. W., D'Arrigo, P. J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. B. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Gay, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva-Díaz and L. G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(10): 2137-2152.
- Stahle, D. W., M. K. Cleaveland, M. D. Therrell and J. Villanueva-Díaz. 1999. Tree-ring reconstruction of winter and summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years. 10<sup>th</sup> Conference of Global Change Studies, 10-15 January. American Meteorological Society, Dallas, Texas, p. 205-211.
- Stat Soft Inc. 2000. STATISTICA Software, Kernel version 5.5 A. 1984-2000. Tulsa, Oklahoma, USA.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago. USA. 73 p.
- Swetnam, T. W., M. A. Thomson and E. K. Sutherland. 1985. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliate trees. *Spruce Budworms Handbook*. USA. 39 p.
- Villanueva-Díaz, J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano-Paredes, M. D. Therrell and M. K. Cleaveland. 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climate Change* 83:117-131.
- Villanueva-Díaz, J., P. Z. Fulé, J. Cerano-Paredes, J. Estrada-Avalos, I. Sánchez-Cohen. 2009. Reconstrucción de precipitación estacional para el Barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista Ciencia Forestal en México*. Vol. 34 Núm. 105: 37-69 p.

