

PRECIPITACIÓN RECONSTRUIDA PARA LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NAZAS, DURANGO

RECONSTRUCTED PRECIPITATION FOR THE UPPER NAZAS RIVER BASIN, DURANGO

Julián Cerano Paredes¹, José Villanueva Díaz¹, Ricardo David Valdez Cepeda², Vicenta Constante García¹, José Luis González Barrios¹ y Juan Estrada Ávalos¹

RESUMEN

La variabilidad referente a la precipitación de los últimos 410 años (1599 - 2008) del ciclo invierno-primavera (noviembre-junio) en la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango, México se reconstruyó a partir de la cronología o serie de tiempo desarrollada con base en anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii*, que la explicó en 64%. La reconstrucción para estos cuatro siglos, validada con registros de precipitación y datos de archivos históricos, permitió determinar la presencia de sequías severas entre los periodos 1665 - 1688, 1695 - 1718, 1774 - 1791, 1798 - 1813, 1890 - 1896 y 1945 - 1963. Así, en la correspondiente a este último, de 1948 a 1963, se presentó la más importante del siglo XX; así como de, esos 410 años, por su impacto en la sociedad y la economía; sin embargo, aquellas de 1665 - 1688 y 1695 - 1718, pudieron haber causado efectos similares por su intensidad. En la parte alta de la cuenca, la precipitación es modulada de manera significativa ($p < 0.05$) por El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) tanto en su fase fría (La Niña), al producir intensa escasez de agua con repercusiones económicas, políticas y sociales para los pobladores de la Comarca Lagunera, como en su fase cálida (El Niño), con importantes incrementos en la pluviometría de la región.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, disponibilidad de agua, El Niño Oscilación del Sur, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, reconstrucción de precipitación y sequía.

ABSTRACT

A tree-ring series of 400-year length was developed from a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) stand located at the northwestern corner of the upper Nazas river watershed at Durango, México. The ring-width chronology explained 64% of the seasonal precipitation variability and the reconstruction which extended 410 years (1599 - 2008) was verified with instrumental climatic data and historic archives. Dry spells were detected in the reconstruction in the periods 1665 - 1688, 1695 - 1718, 1774 - 1791, 1798 - 1813, 1890 - 1896, and 1945 - 1963. The most intensive drought in the 20th century occurred from 1948 to 1963 and provoked significant social and economic impacts. Previous droughts occurred in the 17th (1665 - 1688) and 18th (1695 - 1718) centuries probably had similar effects. The reconstructed precipitation was modulated by El Niño-Southern Oscillation. The cold phase (La Niña) produced severe droughts, and the warm phase (El Niño) above-normal precipitation. The impact of this weather pattern in the availability of water for the Nazas river that drains into the Comarca Lagunera region were it is used for different purposes.

Key words: Tree rings, water availability, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, El Niño Southern Oscillation, precipitation reconstructed, drought.

Fecha de recepción: 6 de agosto de 2010

Fecha de aceptación: 14 de marzo de 2012

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria - Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, INIFAP. Correo-e: cerano.julian@inifap.gob.mx

²Centro Regional Universitario Centro Norte, Universidad Autónoma Chapingo.

INTRODUCCIÓN

La mayor importancia de la Sierra Madre Occidental no radica en la ganadería, la agricultura ni la minería (actividades económicas relevantes en esta región) sino en sus recursos hídricos, ya que es una fuente de agua para el norte de México y, en particular, para todos los grandes ríos nacidos de ella y que escurren hacia el Atlántico (río Conchos, afluente del Bravo) y el Pacífico (río Fuerte, Yaqui o Humaya) o hacia una depresión endorreica en la zona árida (río Nazas) (Descroix *et al.*, 2004).

En el periodo colonial, estas y otras fuentes hidrológicas se aprovecharon para la fundación de localidades próximas a ellas como fueron Culiacán en el río Humaya, El Fuerte en el río del mismo nombre y Ciudad Obregón en el Yaqui, hoy grandes ciudades. La tendencia continuó al pasar los años, y por ello surgieron las poblaciones de Hermosillo, Jiménez y Torreón, al lado de los ríos Sonora, Conchos y Nazas, respectivamente (Descroix *et al.*, 2004).

El Nazas, constituido desde la parte alta de la cuenca por el río Ramos, formado por los afluentes de los ríos Tepehuanes y Santiago, y por el Sixtín (Inard, 2004) pertenece a la Región Hidrológica 36 (RH 36), la cual es una de las 37 existentes en México y una de las tres regiones endorreicas del norte del país (SARH, 1970; INEGI, 1980; Loyer *et al.*, 1993).

La Comarca Lagunera, localizada al centro de la RH 36, es una región agrícola que se dedicó a la producción de algodón y que, en la década de 1980, se destinó a la de forrajes para la alimentación de ganado, en especial alfalfa de alto rendimiento; situación que la convirtió en la primera cuenca lechera de México, con una producción elevada de lácteos en pleno desierto (Descroix *et al.*, 1997, y 2004). Su zona irrigada, que comprende 160,000 ha, depende de los escurrimientos procedentes de la cuenca alta del Nazas, que aportan al año 10^9 m³ (Descroix *et al.*, 1997).

La variabilidad de los escurrimientos de los ríos está influenciada por fenómenos climáticos de circulación general como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), el cual impacta en la variación de la precipitación del norte de la república mexicana (Magaña, 1999; Magaña *et al.*, 2003) y el suroeste de Estados Unidos de América, como lo han demostrado diversos estudios dendrocronológicos (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano-Paredes *et al.*, 2009). Por tanto, el ENSO es parte fundamental de un vasto y complejo sistema de fluctuaciones climáticas (Trenberth, 1997).

Tales condiciones propician que el volumen de agua de las presas que dependen de los escurrimientos de la Sierra Madre Occidental en ciertas épocas haya mermado, como en la década de 1950 la presa Lázaro Cárdenas, de la cual se abastece la zona agrícola de la Comarca Lagunera; sin

INTRODUCTION

The economic relevance of Sierra Madre Occidental stems not from its agriculture, livestock raising, nor its mining, but from its water resources. Sierra Madre Occidental is the water catching area for most of northern Mexico. This mountain range drains towards the Pacific through Fuerte, Yaqui, and Humaya rivers. It drains towards the Atlantic through Conchos river (tributary of Bravo river), and it also runs towards an endorheic depression in the arid plains of the Nazas river (Descroix *et al.*, 2004).

During colonial times, these and other water sources for the foundation of locations nearby them such as Culiacán along Humaya river, El Fuerte along the river with the same name and Ciudad Obregón along the Yaqui river, big cities at present. This trend continued through the years, and thus, Hermosillo, Jiménez, and Torreón, cities along Sonora, Conchos, and Nazas rivers, respectively (Descroix *et al.*, 2004).

Nazas river is made up, from its highest part at the basin, by Ramos river, which is made up by Tepehuanes, Santiago and by Sixtín rivers (Inard, 2004). These rivers belong to Hydrologic Region 36 (RH 36), one of 37 Mexican regions, and one of three endorheic watersheds in the north of the country (SARH, 1970; INEGI, 1980; Loyer *et al.*, 1993).

Comarca Lagunera is an agricultural region at the center of RH 36. Cotton is traditionally grown. However, fodder production has been an increasingly important activity since the 1980's. High yield alfalfa crops have been particularly important for countless dairy farms in the middle of the desert (Descroix *et al.*, 1997, 2004). Some 160,000 ha of irrigated cropland depend from a yearly discharge of 10^9 m³ from Nazas river (Descroix *et al.*, 1997).

The variability of runoff of rivers is affected by climatic phenomena of general circulation such as El Niño Southern Oscillation (ENSO), which impacts upon the variation of the Northern precipitation of the country (Magaña, 1999; Magaña *et al.*, 2003) and Southeast United States of America, as several dendrochronological studies (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano-Paredes *et al.*, 2009) have proved. Hence, ENSO can be seen a fundamental part of a vast and complex system of climatic fluctuations (Trenberth, 1997).

At certain times climatic patterns have resulted in reduced runoff from Sierra Madre Occidental, and less water stored in dams. An event like this occurred in the 1950's when Lázaro Cárdenas dam could not meet the irrigation demands from Comarca Lagunera. This dam is the largest most important reservoir in Nazas river. During the 1990's decade water scarcity made a turn for the worse. Lázaro Cárdenas dam stood near empty for several years. Underground water was pumped at a rate three to five times faster than the recharge rate for over fifty years. Water table in the aquifer

embargo, en la década de 1990 el problema se agudizó, de tal forma, que durante varios años dicha presa, la más importante de la cuenca del Nazas, estuvo casi vacía. Esta circunstancia provocó la sobreexplotación del manto acuífero, cuyo promedio ha disminuido 1.75 m año⁻¹, pues por más de medio siglo se han bombeado volúmenes tres a cinco veces superiores a la recarga natural (Rigal, 1988; González, 1992; Brouste, 1997).

Ante la escasez del preciado líquido en la Comarca, en el presente estudio se plantearon los siguientes objetivos: 1) reconstruir la variabilidad de la precipitación para los últimos cuatro siglos, 2) analizar el comportamiento de eventos de baja frecuencia y 3) examinar la influencia de fenómenos climáticos de circulación general, como el ENSO en la variabilidad de la precipitación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se localiza en la Sierra Madre Occidental, en la parte alta de la cuenca del río Nazas, subcuenca Sardinas, en el sitio denominado Ciénega de la Vaca, municipio Tepehuanes, Durango (Figura 1). El tipo de vegetación dominante corresponde a un bosque de clima templado de coníferas como *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schlecht., *Pinus teocote* Schlecht. et Cham., *Pinus durangensis* Martínez y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (García-Arévalo y González-Elizondo, 1998). En esta investigación se trabajó con *P. menziesii*, por ser una de las especies más sensibles para el registro de los cambios ambientales y, por tanto, con mejor potencial para reconstruir series dendroclimáticas (Stahle *et al.*, 1998).

dropped 1.75 m per year in half a century (Rigal, 1988; González, 1992; Brouste, 1997).

Scarcity of the vital liquid in this region is the reason for this research. Objectives chosen are: 1) portray rainfall variability of the last four centuries; 2) assess low frequency events; and 3) find any influence on rainfall variability that might have come from general climatic circulation phenomena such as ENSO.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study case is Ciénega de la Vaca, Tepehuanes municipality, Durango, Mexico. It is part of subwatershed Sardinas, Nazas river watershed, Sierra Madre Occidental.

Dominant vegetation cover in the study area is a temperate conifer forest. Common species include *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schlecht., *Pinus teocote* Schlecht. et Cham., *Pinus durangensis* Martínez, and *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (García-Arévalo and González-Elizondo, 1998). This research used *P. menziesii* wood samples because it is a species that responds to environmental changes, and this behavior facilitates finding good dendroclimatic series (Stahle *et al.*, 1998).

Study area climate is temperate, subhumid. Total annual precipitation ranges from 470 to 500 mm. Winter rainfall amounts to 12.8 % (60 mm) of the yearly precipitation. Rainfall peaks at 369 mm during summer (June to September); this figure represents 78.5 % of the annual total. Mean annual temperature reaches 10 °C,



Figura 1. Localización geográfica de Ciénega de la Vaca y de las estaciones climáticas vecinas (El Tarahumar y Tepehuanes) empleadas para el análisis dendroclimático.

Figure 1. Geographic location of Ciénega de la Vaca, and near by weather stations (El Tarahumar, Tepehuanes) used for dendroclimatic analysis.

El clima del área es templado subhúmedo, con una precipitación total anual de 470 a 500 mm. El porcentaje de lluvia invernal con respecto a la anual es 12.8% (60 mm), pero la precipitación alcanza su máximo nivel en el verano, con 369 mm (junio a septiembre), que representa 78.5% de la lluvia total anual. La temperatura media al año es de 10°C, la media mensual más elevada de 30°C (mayo y junio) y la más baja de -0.6°C (enero) (IMTA, 2000).

Metodología

Se utilizaron muestras de incrementos (virutas) de arbolado vivo extraídas con taladro de Pressler® de 5 mm de diámetro y secciones transversales de arbolado muerto cortadas con motosierra Stihl modelo MS 660. Las muestras se prepararon en el Laboratorio de Dendrocronología del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria-Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID-RASPA, INIFAP) en Gómez Palacio, Durango para resaltar los anillos de crecimiento, y se fecharon mediante técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968; Swetnam *et al.*, 1985). Después, cada anillo anual se midió de manera individual con el sistema VELMEX de fase deslizable y precisión de 0.001 mm, que es adaptable a una computadora donde se guardan las bases de datos en forma directa (Robinson y Evans, 1980).

El fechado, la calidad de la respuesta climática y la exactitud de la medición de los anillos se verificó con el programa COFECHA, que correlaciona intervalos de 50 años con traslape entre ciclos de 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Las tendencias biológicas (competencia, supresión, liberación) y geométricas (incremento en el área de fuste con la edad) no relacionadas con el clima se eliminaron con el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1984); al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y luego dividir cada valor anual de medición entre el obtenido de la curva (Figura 2). Mediante dicho procedimiento se obtuvo una serie de índices normalizados, cronologías, con media de 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987; Fritts, 2001).

El programa ARSTAN genera tres versiones de la cronología denominadas estándar, arstan y residual; no obstante, para los análisis se empleó esta última ya que produce una mejor señal climática, pues elimina la autocorrelación (Fritts, 1976).

A fin de conocer la época de lluvia anual que más incide en el crecimiento del arbolado para los años de 1922 a 1981, se utilizaron datos de las estaciones climáticas El Tarahumar, municipio Tepehuanes y Tepehuanes, Durango, por ser las más cercanas al área de estudio y por su extensión y cobertura de registros, ya que abarcan los años de 1964 a 2004 y de 1922 a 1988, respectivamente (Cuadro 1, Figura 1). Ambas estaciones mostraron una correlación significativa ($p < 0.05$) con los índices de anillo, de ahí que se trabajara con datos promedio regionales de precipitación, los cuales se tomaron del programa

and the highest monthly average raises up to 30 °C (May and June). The mean coldest temperature is -0.6 °C (January) (IMTA, 2000).

Methods

Core samples from live trees were collected using a Pressler® increment borer with 5 mm gauge. Additional samples were taken from cross sections of dead trees. Stihl model MS 660 chainsaw was used to section dead downed logs. Samples were treated to increase ring contrast. Processing took advantage of facilities at Laboratorio de Dendrocronología, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID-RASPA, INIFAP), Gómez Palacio, Durango. Standard dendrochronological techniques (Stokes and Smiley, 1968; Swetnam *et al.*, 1985) were used when dating samples. Individual rings were measured with a sliding phase VELMEX system. This instrument has a 0.001 mm resolution, and results can be directly input into a computer for storage on a data base, and for further data processing (Robinson and Evans, 1980).

COFECHA software (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001) was used to estimate the climatic response quality and measurement accuracy. COFECHA correlates 50 years segments overlaid in 25 years cycles. Biologic phenomena (competition, suppression, release), and geometric trends (bole basal area increment through time), were screened out because they are unrelated to climate. This latter process used ARSTAN software (Cook and Holmes, 1984).

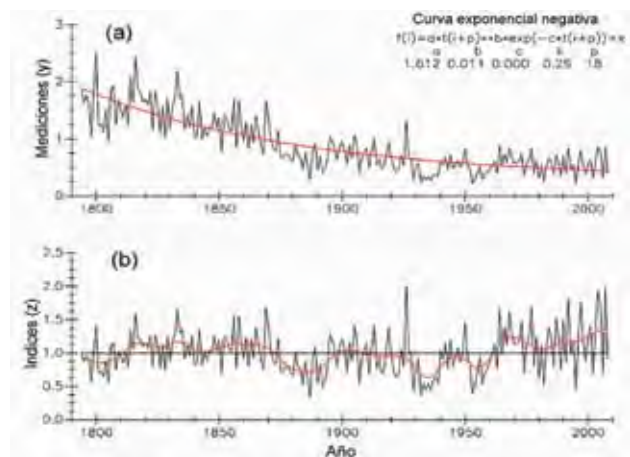


Figura 2. Estandarización de series de tiempo. (a) Caída exponencial en crecimiento de un árbol por efecto de la edad, y (b) Índices normalizados después de aplicar la curva de mejor ajuste.

Figure 2. Standardized time series. (a) Exponential decline in tree growth due to age. (b) Normalized indices after screening out best fit curve.

Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC) (IMTA, 2000). Así, en la determinación de la influencia de la variable precipitación en el crecimiento anual de la especie se empleó el análisis Función de Respuesta que fue generado mediante la correlación entre los índices y datos mencionados (Cuadro 1) y se verificó con el programa PRECON (Fritts, 1999).

Una vez analizada la respuesta climática, se procedió a desarrollar una ecuación de transferencia entre los datos observados de precipitación y el índice de anillo total para ellos se usó el programa STATISTICA Kernel release 5.5 (Stat Soft Inc., 2000). Con este modelo se reconstruyó la precipitación para el lapso que cubren dichos registros, y con la subrutina VERIFY5 del paquete de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL por sus siglas en inglés) se aplicó una prueba de calibración a la mitad de los datos climáticos, tanto observados como reconstruidos, para examinar la relación entre ambas variables; en una etapa posterior, a la mitad restante se le asignó una

ARSTAN fits the best curve to a time series. Curves tested include straight line and negative exponential models. The rate of observed to fitted values are computed (Figure 2). This procedure outputs normalized indices (chronologies) with mean 1.0, and homogeneous variance (Cook, 1987; Fritts, 2001).

Climate data used are those from El Tarahumar and Tepehuanes stations in Durango. These stations are the closest ones to the study area, they have a long record registered (1964 - 2000, and 1922 - 1988 respectively), and their measurements are valid for a wide geographic radius. (Table 1, Figure 1) The 1922 to 1981 period was used to find the season best associated to tree growth. Records from both stations significantly correlate ($p < 0.05$) with ring values. For that reason precipitation values were averaged between stations. These averages were computed using Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC) software (IMTA, 2000). Response Function analysis was used to assess rainfall influence on annual tree growth (Table 1). Influence was verified through PRECON software (Fritts, 1999).

Cuadro 1. Cronología de anillo total y estaciones climáticas usadas con fines de reconstrucción.
Table 1. Total ring chronology and climate data used.

Nombre	Latitud N	Longitud W	Altitud (msnm)	Periodo	SM ^a	r ^b
Cronología de anillo total						
Ciénega de la Vaca	25.549	-105.600	2550	1599 - 2008	0.37	0.71
Nombre	Latitud N	Longitud W	Elevación (msnm)	Periodo	% Datos	
Estaciones climáticas						
Tepehuanes	25.300	-105.750	1967	1922 - 1988	98.6	
El Tarahumar	25.617	-106.324	2435	1964 - 2004	99.7	

^a Sensibilidad Media, porcentaje promedio de los cambios de los índices de la cronología de un año a otro (Fritts, 2001).

^b Correlación promedio entre todas las series de crecimiento ($p < 0.05$).

^a Mean sensibility, percent change in chronology index from one year to the following (Fritts, 2001).

^b Mean correlation among all growth series ($p < 0.05$).

prueba de verificación (Fritts, 1991). Por último, la ecuación se validó para el periodo total de datos de lluvia disponibles y se utilizó para elaborar la reconstrucción de la precipitación en la longitud total de la serie dendrocronológica.

A la resolución anual o serie de alta frecuencia se le ajustó una curva decenal flexible o de baja frecuencia, para resaltar los eventos secos y lluviosos presentes en la reconstrucción (Cook y Peters, 1981). Las etapas de sequía detectadas en ella se validaron con documentos históricos y estudios dendrocronológicos del norte de México.

El fenómeno ENSO, además del componente oceánico (El Niño y La Niña), involucra uno atmosférico medido por el Índice de Oscilación del Sur, el cual se cuantifica por medio de la

Recent values registered in the two weather stations were of poor quality. They displayed a weak correlation with chronology, so only values from 1922 to 1981 were examined in search of the annual season that best explained *P. mensiezii*'s growth. Once found, a transfer equation was developed for this period of climatic response using STATISTICA Kernel, release 5.5 (Stat Soft Inc., 2000). This equation relates observed precipitation values with the total ring index, and its purpose is to provide estimates of past precipitation for the entire ring time series. A calibration of half the climate series was possible by the use of subroutine VERIFY5 from University of Arizona's Dendrochronology Program Library (DPL). Calibration assessed the relationship among the two variables. The remaining half set of results underwent a validation process assessing the strength of the historic data reconstruction (Fritts, 1999). Finally, equation

anomalía del gradiente de presión entre Darwin (Australia), en general con una presión más baja, y Tahití, con una más alta. Debido a la gran extensión del Océano Pacífico, la comunidad científica internacional lo ha dividido en cuatro regiones para su estudio y vigilancia: Niño 1.2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4 (Trenberth, 1997; Magaña, 1999). Con la finalidad de analizar el impacto del ENSO en la variabilidad hidroclimática de la parte alta de la cuenca del río Nazas se relacionaron los índices de ancho de anillo y los del Niño 3.4 mediante el programa MATLAB 6.5 (MathWorks, 2002). Para tal efecto, se utilizaron gráficos de resolución anual y sus espectros potenciales de ondeleta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De un total de 50 series de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (80% de árboles vivos y 20% de árboles muertos y madera semienterrada), 40 procedentes de 28 árboles se fecharon al año exacto de su formación. Los resultados de COFECHA señalaron una intercorrelación entre las series de 0.706 ($p < 0.05$). Respecto a la cronología o serie de tiempo, esta se generó para el período de 1599 a 2008 (Figura 3).

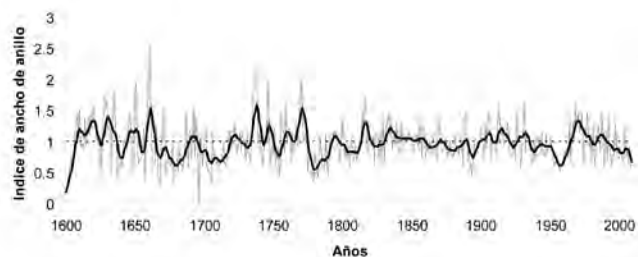


Figura 3. Serie de índices dendrocronológicos de 410 años de extensión generada para la parte alta de la cuenca del río Nazas.

Figure 3. Dendrochronological indices series for a span of 410 years in the upper Nazas river watershed.

Función de respuesta

El análisis entre los índices de anillo total y la precipitación mensual regionalizada con dos estaciones climáticas para el periodo julio del año previo a agosto del año actual de crecimiento (14 meses en total) indicó una asociación positiva y significativa ($p < 0.05$), entre ambas variables para los meses de diciembre del año previo y enero del año actual de crecimiento. Esta asociación fue positiva, aunque no significativa, para los meses de febrero, marzo, abril, mayo y julio (Figura 4). Al desarrollar un análisis por intervalo estacional, no obstante que los meses de noviembre y junio mostraron coeficientes negativos,

was validated for the entire rainfall record and then used to estimate precipitation for the complete dendrochronological time series.

A flexible decade curve, which is a low frequency model, was fit to the high frequency annual series. The smoothed curve unveils drier and wetter periods in the historic reconstruction (Cook and Peters, 1981). Drought periods were confirmed by matching them to historic documents, as well as to other dendrochronological studies of northern Mexico.

In addition to the oceanic component (El Niño, La Niña), ENSO involves an atmospheric component too. This latter effect is denoted as Southern Oscillation, and it is defined as an anomaly in the pressure differential between Darwin (Australia), and Tahiti (French Polynesia). Generally, Darwin will bear a lower pressure than Tahiti. The scientific community considers that the extreme size of the Pacific Ocean is better studied and monitored if divided into four regions Niño 1.2, Niño 3, Niño 4, and Niño 3.4 (Trenberth, 1997; Magaña, 1999). Niño 3.4 oscillation was the one chosen as explanatory variable for ring width indices from the uplands of Nazas river watershed. This analysis called for annual resolution scatter plots and their wavelet potential spectrum processing through MATLAB 6.5 software (MathWorks, 2002).

RESULTS AND DISCUSSION

A total of 50 growth series from samples of *Pseudotsuga menziesii* were dated. Live tree samples represent 80 % of the total sample set, and 20 % were wood samples from dead trees and downed partially buried woody debris. Exact date estimation was possible for 40 series taken from 28 trees. Output from COFECHA indicate strong correlation among series (0.706, $p < 0.05$). A joint time series was possible to build for the 1599 to 2008 time period (Figure 3).

Response function

Analysis of total ring index and regional monthly precipitation indicate a positive and significant association ($p < 0.05$) among from two weather stations for the period between July of the previous year to August of the present growth year (14 months) indicate the two variables for the December of the previous year to January of the current year. The same relationship for February, March, April, May and July was positive but not significant (Figure 4). Further examination of season interval found that the best correlation ($r = 0.80$, $p < 0.0001$, 1922 - 1981, $n = 60$) was for the November to June season (winter and spring), although November and June had negative coefficients (Figure 5).

se determinó que la mejor correlación ($r = 0.80$, $p < 0.0001$, 1922 - 1981, $n = 60$) se dio de noviembre a junio (estaciones invierno-primavera) (Figura 5).

En la parte alta de la cuenca del río Nazas, en el verano, se registra el mayor porcentaje de lluvia anual: 78.5%, y en el invierno es de 12.8% (IMTA, 2000). La reconstrucción de noviembre a junio constituye 34% de la precipitación anual y 45% de la veraniega, lo que demuestra la importancia de la precipitación reconstruida en el crecimiento del arbolado. Esto se explica por las bajas temperaturas que reducen la evaporación y, en general, por la presencia de lluvias ligeras en lapsos más prolongados, lo cual favorece la humedad del suelo, cuyo aprovechamiento se da al inicio de la estación de crecimiento.

La respuesta del crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* a la precipitación invernal en la región norte de México y suroeste de Estados Unidos de América ha sido discutida ampliamente en diversos estudios paleoclimáticos (Stahle y Cleaveland, 1993; Stahle et al., 1999; Díaz-Castro et al., 2002; Cleaveland et al., 2003; Villanueva-Díaz et al., 2007 y 2009; Cerano-Paredes et al., 2009 y 2011).

Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera

Al correlacionar la precipitación invierno-primavera, que comprende de noviembre del año previo a junio del año actual, con el índice de ancho de anillo del periodo común 1922 - 1981 se obtuvo un valor de 0.80 ($p < 0.0001$), lo que señala un potencial para generar un modelo de regresión con fines de reconstrucción dendroclimática tan extensa en el tiempo como la cronología (figuras 5 y 6).

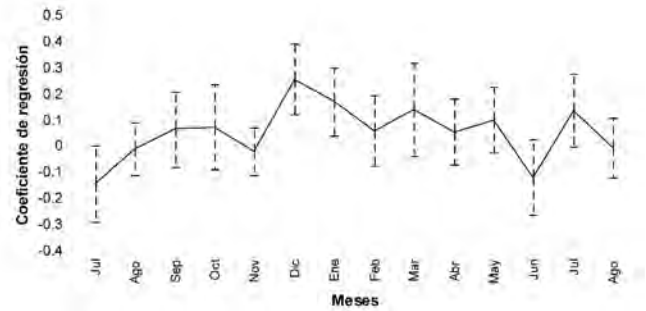


Figura 4. Función de respuesta entre la cronología de anillo total de *Pseudotsuga menziesii* y los registros de precipitación regional para el periodo de 1922 - 1981 de las estaciones climáticas El Tarahumar y Tepehuanes.

Figure 4. Response function of regional precipitation 1922 - 1981 from El Tarahumar and Tepehuanes weather stations, to total ring chronology of *Pseudotsuga menziesii* wood samples.

The uplands of Nazas river watershed receive most of its annual rainfall during summer, 78.5 %, while an additional 12.8 % falls during winter (IMTA, 2000). Rain from November to June adds up to 34 % of the annual precipitation, and it represents 45 % of the summer rain. This suggests that the modeled precipitation pattern is likely associated to tree growth. The November to June season also features low temperatures, reduced evapotranspiration, and for the most part rain showers are light and occasional. These characteristics may favor soil humidity just in time for the growing season.

Pseudotsuga menziesii's response to winter rain in the north of Mexico and southwest USA has been widely researched in paleoclimatic studies (Stahle and Cleaveland, 1993; Stahle et al., 1999; Díaz-Castro et al., 2002; Cleaveland et al., 2003;

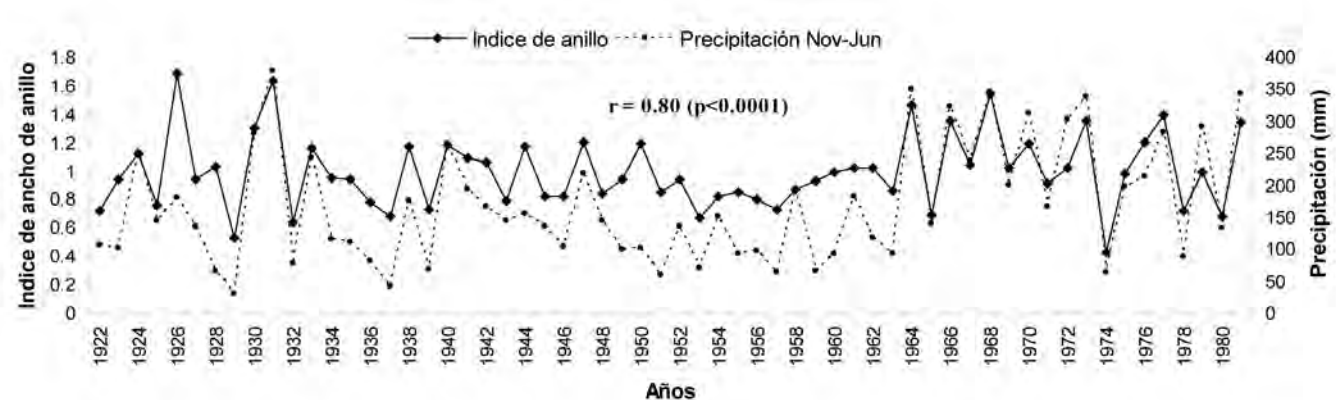


Figura 5. Asociación entre el índice de ancho de anillo y la precipitación regional estacional noviembre-junio para el período común 1922 - 1981.

Figure 5. Relation between ring width index and seasonal November-June precipitation 1922 - 1981.

Calibración y verificación

El modelo utilizado para la reconstrucción incluyó tanto el intervalo de datos de precipitación observada regional, que comprende de 1922 - 1981, como de los índices de la cronología de anillo total para el lapso común. Al comparar la precipitación observada y reconstruida, este se calibró con datos del subperiodo 1952-1981 y se verificó con el de 1922 - 1951 (cuadros 2 y 3).

Los resultados indican una $r = 0.85$ ($r^2 = 0.72$, $p < 0.00001$) entre la precipitación observada y la reconstruida, lo cual explica 72% de la variabilidad de la lluvia para el periodo de calibración. Por su parte, la verificación presentó una $r = 0.77$ y explica 59% ($r^2 = 0.59$, $p < 0.00001$) de la variabilidad. La correlación entre el total de precipitación observada y la reconstruida fue de $r = 0.80$ ($r^2 = 0.64$, $p < 0.00001$) (Figura 7).

Dado que los subperiodos con los cuales se realizaron tanto la calibración como la verificación del modelo mostraron una relación significativa, se empleó el lapso total de datos climáticos disponibles (1922 - 1981) para generar la ecuación de reconstrucción, que tuvo una $r = 0.80$ ($r^2 = 0.64$, $p < 0.00001$) (Cuadro 2).

La subrutina VERIFY5 del DPL indicó que la calibración y 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 para los años de 1922 a 1981 se consideró válido en términos estadísticos a fin de reconstruir la precipitación en el tiempo total de la serie dendrocronológica (1599 - 2008) (Cuadro 2).

Villanueva-Díaz *et al.*, 2007 and 2009; Cerano-Paredes *et al.*, 2009 and 2011).

Winter-spring rainfall reconstruction

Winter-spring precipitation encompasses rainfall from November the previous year to June of the current year. Ring width index correlation with winter-spring precipitation 1922 - 1981 reached 0.80 ($p < 0.00001$). The strong association seen suggests there is a potential to fit a regression model describing dendroclimatic history as long as chronology data supports it in all its length (figures 5, 6).

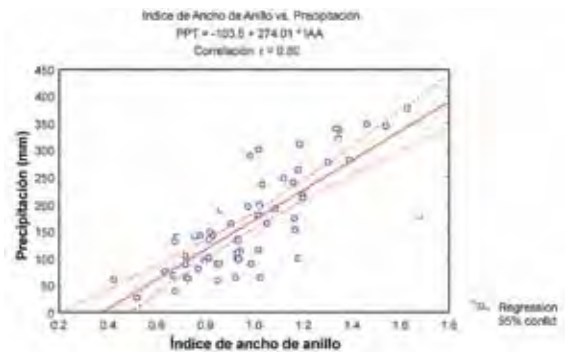


Figura 6. Dispersión del modelo de regresión lineal.
Figure 6. Scatter plot and linear regression model.

Calibration and verification

The model used to rebuild the time sequence included precipitation data for the 1922 - 1981 time span, and total ring chronology index for the same period. Reconstructed precipitation values were calibrated using the relationship between observed and predicted precipitation for the 1952 - 1981 period (tables 2, 3).

Cuadro 2. Calibración del modelo para la reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (noviembre-junio).
Table 2. Calibration model for reconstructed winter-spring precipitation (November-June).

Periodo	R ²	Coeficientes		Err. St		Prueba (t)		p	
		a	b	a	b	a	b	a	b
1922 - 1951	0.59	-78.62	227.28	36.34	35.72	-2.16	6.36	0.039	0.000
1952 - 1981	0.72	-127.68	319.46	38.10	37.24	-3.35	8.57	0.002	0.000
1922 - 1981	0.64	-103.63	274.00	28.65	28.08	-3.61	9.75	0.000	0.000

Cuadro 3. Pruebas estadísticas de la verificación para la reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (noviembre-junio).
Table 3. Statistical verification tests of reconstructed winter-spring precipitation (November-June).

Periodo	Correlación	Reducción del	Valor de	Prueba de signos	Primera diferencia
	Pearson (r)	error	(t)		significativa
1922 - 1951	0.77*	0.411*	2.318*	4*	3*
1952 - 1981	0.85*	0.370*	4.228*	4*	4*
1922 - 1981	0.80*	0.391*	4.557*	8*	7*

* = Significativos, $p < 0.05$
* = Significant at $p < 0.05$

El modelo bivariado utilizado fue el siguiente:

$$Y_t = -103.63 + 274.00 * X_t$$

Donde:

- Y_t = Valor de la precipitación (mm) reconstruida noviembre-junio para un año específico.
- X_t = Índice de anillo total.

Results indicate $r = 0.85$ ($r^2 = 0.72$, $p < 0.0001$) between observed and estimated precipitation. These results explain 72 % of rainfall variability during the calibration period. Verification attained an $r = 0.77$, which explains 59 % ($r^2 = 0.59$, $p < 0.0001$) of the variability. Total observed and reconstructed precipitation results in $r = 0.80$ ($r^2 = 0.64$, $p < 0.0001$) (Figure 7).

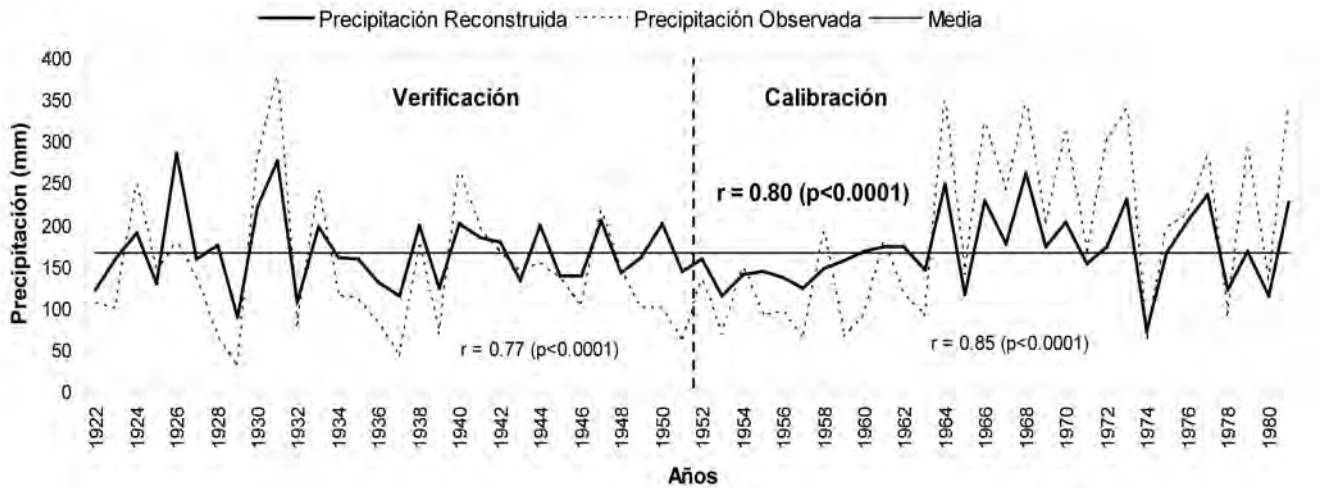


Figura 7. Comparación entre la precipitación reconstruida (línea sólida) y observada (línea punteada) de noviembre a junio, 1922 - 1981 (60 años).

Figure 7. Comparison between estimated (solid line), and observed precipitation (dotted line) during November to June 1922 - 1981 (60 years).

Variabilidad de la precipitación reconstruida

La reconstrucción de la precipitación de los últimos 410 años (1599 - 2008) permite observar la presencia de sequías extremas ocurridas en los periodos de 1665 - 1688, 1695 - 1718, 1774 - 1791, 1798 - 1813, 1890 - 1896 y 1945 - 1963; sin embargo, la peor de ellas, registrada en la parte alta de la cuenca del río Nazas en el siglo XX se reconstruyó para los años de 1948 a 1963 de acuerdo con la información de lluvia del lapso noviembre-junio de las estaciones climáticas El Tarahumar y Tepehuanes. En estos 16 años de precipitación reducida, 15 estuvieron muy por debajo de la media, excepto el de 1958, que apenas alcanzó el promedio de los últimos 60 años de datos registrados (Figura 7). Lo anterior se atribuye a la presencia de ENSO en su fase cálida (El Niño), que propició un incremento no significativo en la lluvia para ese año (Trenberth, 1997). En función de la precipitación reconstruida, ningún año superó el valor medio de 169 mm (Figura 8) con una desviación estándar de 55 mm. Florescano y Swan (1995) citan a 1953, 1956 y 1957 con escasez de agua muy acentuada y los ubican entre los siete años con menor precipitación baja del siglo XX.

Las sequías de 1956 y 1957 ocasionaron desempleo, migración y movilizaciones campesinas: la primera afectó a más de 60,000 campesinos en el norte de México, situación que

The total climate data set 1922 - 1981 was used during calibration because shorter periods had significant relationships. The resulting reconstruction equation reached an $r = 0.80$ ($r^2 = 0.64$, $p < 0.0001$) (Table 2).

When applied, DPL's VERIFY5 subroutine returned a significant ($p < 0.05$) passing grade for calibration and verification. Attributes tested include correlation, error reduction, t statistic, and first significant difference. Then the regression model for 1922 - 1981 is statistically valid when applied to reconstruct precipitation time series for the entire dendrochronological series, 1599 - 2008 (Table 2).

The bivariate model used was:

$$Y_t = -103.63 + 274.00 * X_t$$

Where:

- Y_t = Estimated November-June precipitation (mm) for a given year
- X_t = Total ring index

Reconstructed precipitation variability

Precipitation from the last 409 years (1599 - 2008) was reconstructed. The historic trend shows extreme drought episodes during 1665 - 1688, 1695 - 1718, 1774 - 1791, 1798 - 1813, 1890 - 1896,

favoreció la emigración a Estados Unidos de América, como en La Comarca Lagunera, las labores agrícolas se paralizaron. Respecto a la segunda, esta se extendió al centro de México y provocó un incremento en el desempleo y la migración, así como el surgimiento de luchas campesinas como aquella de La Comarca, la cual se extendió hasta principios de la década de 1960 (Florescano, 1980).

La severa escasez del líquido durante 1951, 1953, 1956 y 1958, de manera especial en 1957 que fue muy extrema, impactó al país y a gran parte del suroeste de Estados Unidos (Florescano y Swan, 1995). De igual forma, la documentada de 1950 - 1965 en el estado de Durango fue una de las más extensas (Stahle *et al.*, 1999; Cleaveland *et al.*, 2003). Fenómeno que también se registró en Sonora (Díaz *et al.*, 2002), Texas (Stahle y Cleaveland, 1988) y Nuevo México (Grissino-Mayer, 1995), aunque para el último se considera que dicho intervalo ha sido el más intenso de los 1000 años recientes.

No obstante, que la insuficiencia de agua en el periodo 1948 - 1963 en el norte de México fue la más profunda del siglo XX y la más importante de los 400 años más recientes, si se consideran aspectos sociales y económicos, las sequías reconstruidas de finales del siglo XVII (1665 - 1688) y principios siglo

and 1945 - 1963. The most severe drought, according to reconstructed November to June rainfall, was the one during 1948 to 1963, affecting the upper portion of the watershed. Rain fell below average in 15 out of 16 years during this period; the exception year was 1958 when rainfall raised close to the previous 60 year average (Figure 7). This exceptional year is thought to be the effect of ENSO in its warm phase (El Niño). El Niño might have produced an increase in precipitation for that season (Trenberth, 1997). All reconstructed rainfall values are within a standard deviation (± 55 mm) from the series average of 169 mm per year. Florescano and Swan (1995) consider 1953, 1956 and 1957 as extremely dry years. These years are part of the set of the seven driest years recorded during the 20th Century.

Drought during 1956 and 1957 led to unemployment, migration, and peasant unrest. The first year caused strain to more than 60,000 peasants in northern Mexico. Hardship favored migration to the USA. Many of those migrants were those who left Comarca Lagunera where agriculture labor had dwindled. By the second year drought had extended to central Mexico producing unemployment, migration, and peasant political strife such as the one in Comarca Lagunera lasting well into the 1960's (Florescano, 1980).

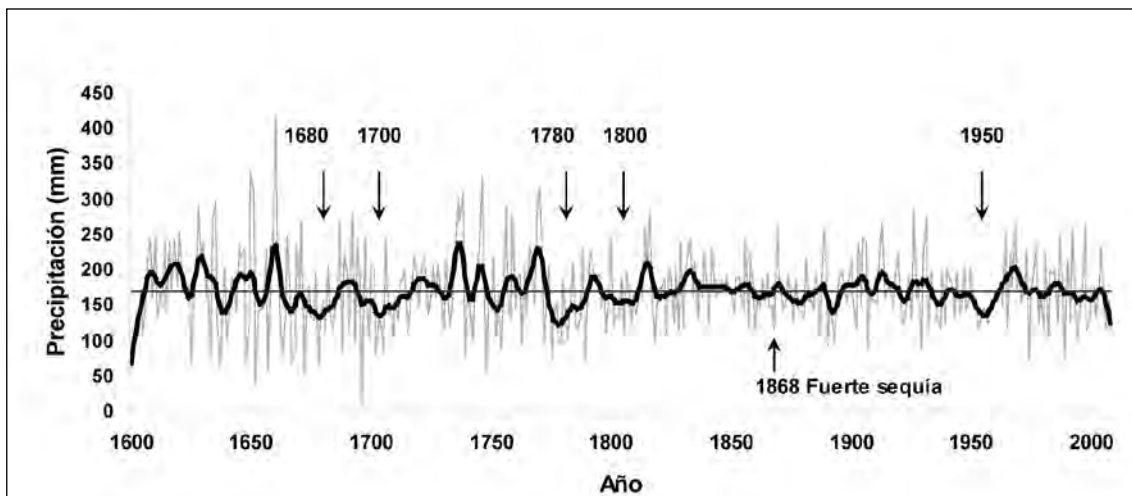


Figura 8. Serie de la precipitación reconstruida invierno-primavera (noviembre-junio) para 1599 - 2008. El periodo húmedo 1657 - 1662 representa el intervalo con mayor cantidad de lluvia en los últimos 400 años.

Figure 8. Reconstructed 1599 - 2008 winter-spring (November-June) precipitation series. The 1657-1662 wet period is the interval with the highest accumulated rain in the last 400 years.

XVIII (1695 - 1718) pudieron haber causado hambrunas y otras calamidades a la sociedad. En ambos lapsos, 17 de los 23 años estuvieron debajo de la media; sin embargo, estos se beneficiaron debido a que en años intermedios tuvieron precipitaciones por arriba del promedio, circunstancia que atenuó los estragos en la población, a diferencia de lo ocurrido durante la sequía de la década de 1950 en la que no se presentaron esos niveles de lluvia. Florescano y Swan (1995) señalan una escasez del líquido muy extrema en 1868 para el norte de México,

Extreme water scarcity during 1951, 1953, 1956, and 1959, and most intense in 1957 caused distress to Mexico and to the US southwest (Florescano and Swan, 1995). Historic documents from Durango rate the 1950 - 1965 period as one of long and severe drought (Stahle *et al.*, 1999; Cleaveland *et al.*, 2003). The same situation was reported for Sonora (Díaz *et al.*, 2002), Texas (Stahle and Cleaveland, 1988), and New México (Grissino-Mayer, 1995); the latter was deemed the most severe drought of the last 1,000 years.

pero no mencionan su impacto socioeconómico. Por otro lado, la cronología de anillos de árboles muestra una reducción en el crecimiento del anillo correspondiente a 1868, lo que sugiere la presencia de condiciones secas para ese año tanto en el norte como en el centro del país (Figura 8).

De la misma forma, se reconstruyeron intervalos lluviosos importantes como los de 1627 - 1635, 1658 - 1662, 1733 - 1740, 1744 - 1747, 1766 - 1773 y 1814 - 1818, entre ellos sobresalen el segundo y tercero por la presencia, en todos los años, de precipitaciones por encima de la media; pese a ello, el de 1658 - 1662 parece el más lluvioso de los últimos 400 años. Para el siglo XX, los años lluviosos más destacados fueron 1926, 1931 y 1997, que se asocian a la influencia de ENSO en su fase cálida (Trenberth, 1997; Magaña, 1999).

El Niño Oscilación del Sur

Las fases cálida (El Niño) y fría (La Niña) forman parte de un ciclo conocido como ENSO. Ambas son ejemplo de la variabilidad climática global que es parte fundamental de un vasto y complejo sistema de fluctuaciones climáticas, con una duración de cuatro años en promedio y un intervalo de dos a siete (Purca, 1999).

En el sur de Estados Unidos de América y norte de México, el ENSO, en su fase cálida, se asocia a condiciones de alta precipitación en el invierno; mientras que, en la fría favorece la presencia de inviernos más secos, lo cual propicia fuertes sequías (Magaña *et al.*, 2003; Caso *et al.*, 2007). Así mismo, la precipitación de invierno en estas regiones está correlacionada de modo significativo con los índices del ENSO (Magaña, 1999). Por otra parte, su influencia en la variabilidad del clima del norte de México se registra de manera importante en los anillos de crecimiento (Cleaveland *et al.*, 1992; Stahley-Cleaveland, 1993; Stahle *et al.*, 1998; Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Villanueva-Díaz *et al.*, 2005 y 2009).

Respecto a la precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, se observa que su relación con los índices del Niño 3.4 (enero-marzo) estimativo de la variabilidad de ENSO para los últimos 115 años (1894 - 2008) es alta (Figura 9).

Los índices del Niño 3.4 en sus valores más elevados representan la fase cálida del ENSO y en los más bajos, la fase fría. Lo anterior permite determinar que la parte alta de la cuenca del río Nazas, durante eventos de La Niña, es afectada por intensas sequías y, por ende, se tienen bajos volúmenes de agua en las presas con un impacto directo en la superficie cultivada de La Comarca Lagunera.

Although economic and social impacts of water scarcity during 1948 - 1963 are well documented, other dry periods such as the one at the end of the 16th Century (1665 - 1688), and early 18th Century (1695 - 1718) most likely produced famine too, and it caused as much damage to society as the former one. Estimated rainfall indicate that rain in each of the two old cases 17 out of 23 years rain fell below average, though previous years' rainfall was above average, a fact that might have led to ease the water situation for the smaller population of that time, relative to the situation at the 1950's, in which there were no rainy preceding years. A dry spell was reported for northern Mexico in 1868 (Florescano and Swan, 1995). No recollection of human impacts is available for this episode. Tree ring chronology shows reduced growth for 1868, and this decline seems to be related to a drier climate in the northern and central Mexico (Figure 8).

On the other hand, rainy intervals were detected for 1627 - 1635, 1658 - 1662, 1733 - 1740, 1744 - 1747, 1766 - 1773, and 1814 - 1818. The second and third periods were outstanding because every year in them rainfall was above average. The 1658 - 1662 appears as the wettest of all in 400 years. During the 20th Century 1926, 1931, and 1997 were years of intense precipitation. They seem related to the warm side of ENSO (Trenberth, 1997; Magaña, 1999).

El Niño Southern Oscillation

ENSO has a warm (El Niño), and a cold phase (La Niña). They both exemplify global climatic variability. Climatic fluctuations occur in a complex pattern that has an average cycle of four years, and they may last from two to seven years (Purca, 1999).

The warm ENSO phase means increased winter rains. The dry phase in ENSO brings dryer winters and severe drought (Magaña *et al.*, 2003; Caso *et al.*, 2007). In this North American region precipitation strongly correlates with ENSO indices (Magaña, 1999). Additionally, tree ring growth in Northern Mexico tightly follows climatic variations (Cleaveland *et al.*, 1992; Stahle and Cleaveland, 1993; Stahle *et al.*, 1998; Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Villanueva-Díaz *et al.*, 2005, and 2009).

The reconstructed precipitation sequence for the upper side of Nazas river watershed is closely associated to El Niño index 3.4 (January-March). This index that tracks down ENSO variability for the last 115 years (1894-2008) (Figure 9).

High values for El Niño 3.4 represent the warm ENSO phase, and low values pertain to the cold phase. During La Niña events the uplands in Nazas river watershed suffer intense drought, low volume gets stored in dams, and direct damages impact crops in Comarca Lagunera.

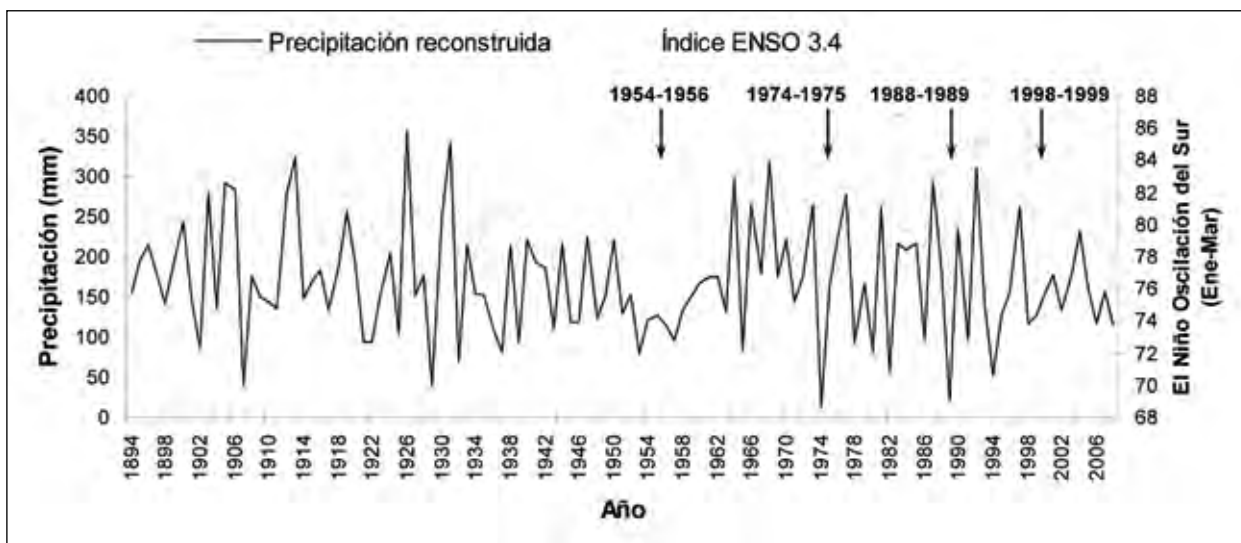


Figura 9. Relación entre la precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas y eventos extremos de El Niño y La Niña.

Figure 9. Extreme El Niño and La Niña events relative to estimated historic precipitation in Nazas river watershed uplands.

Entre los eventos más intensos de La Niña, que en los últimos años han disminuido la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas, sobresalen los ocurridos en los periodos 1954 - 1956, 1974 - 1975, 1988 - 1989 y 1998 - 1999 (figuras 9 y 10). De igual manera, las precipitaciones más altas en las últimas cinco décadas (1950 - 2000) se atribuyen a eventos del ENSO en su fase cálida, en particular los registrados en 1968, 1973, 1977, 1981, 1987, 1992 y 1997 (Figura 10).

Descroix *et al.* (1997) señalan que por su ubicación cercana al litoral Pacífico del continente americano, la región hidrológica 36 es susceptible a la influencia de ENSO. En los últimos 50 años se identificaron periodos calificados como fríos, es decir años La Niña: 1950, 1954 - 1956, 1974 - 1975, 1984 - 1985 y 1998 - 1999 con escasa precipitación.

En 1993 y 1994 se presentó una fuerte escasez del agua en el norte de México, a consecuencia de un evento El Niño, cuyo déficit representó de 40 a 50% de la pluviometría en la RH 36. Derivado de una intensa sequía en 1995 y 1996 atribuible al evento La Niña, los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango perdieron de 10 a 25% de su ganado vacuno, la presa Lázaro Cárdenas registró el volumen de agua más bajo en junio de 1996 y la superficie irrigada en La Comarca Lagunera se redujo a la mitad, para el ciclo agrícola de mismo año (Descroix *et al.*, 1997 y Trenberth, 1997).

En general, los eventos El Niño se presentan con mayor frecuencia que los de La Niña; así, en el intervalo 1950 - 1998 se tuvo un total de 12 episodios El Niño y nueve La Niña (Trenberth, 1997).

Recent intense La Niña events concur with reduced precipitation in the uplands of Nazas river watershed. These periods include 1954 - 1956, 1974 - 1975, 1988 - 1989, and 1998 - 1999 (figures 9 and 10). Moreover, peak rainfall of the last 5 decades (1950 - 2000) match ENSO warm phases, and particularly events recorded in 1968, 1973, 1977, 1981, 1987, 1992, and 1997 (Figure 10).

Hydrologic Region 36 is particularly prone to receive ENSO influences because of the close proximity to the Pacific coast (Descroix *et al.*, 1997). Several instances in the last 50 years can be described as cold periods, that is La Niña events: 1950, 1954 - 1956, 1974 - 1975, 1984 - 1985, and 1998 - 1999. These were instances of diminished discharge stored at water reservoirs.

The 1993 to 1995 period was one of water scarcity in northern Mexico as a result from an El Niño event causing a 40 to 50 % deficit in discharges at RH 36. During the dry years of 1995 and 1996, linked to La Niña, Chihuahua, Coahuila, and Durango states lost 10 to 25 % of their livestock, Lázaro Cárdenas Dam reached the lowest recorded volume in June 1996, and Comarca Lagunera saw shrink in half in the cropping season of that year (Descroix *et al.*, 1997, Trenberth, 1997).

Generally, El Niño events are more frequent than La Niña's. For instance, from 1950 to 1998 there were 12 El Niño episodes, but La Niña returned nine times only (Trenberth, 1997).

Rainfall on the uplands of the watershed significantly declined in 1974 - 1975, and 1988 - 1989. The first period had a sharper decline, the worst in 250 years (Figure 10). The 1954 - 1956

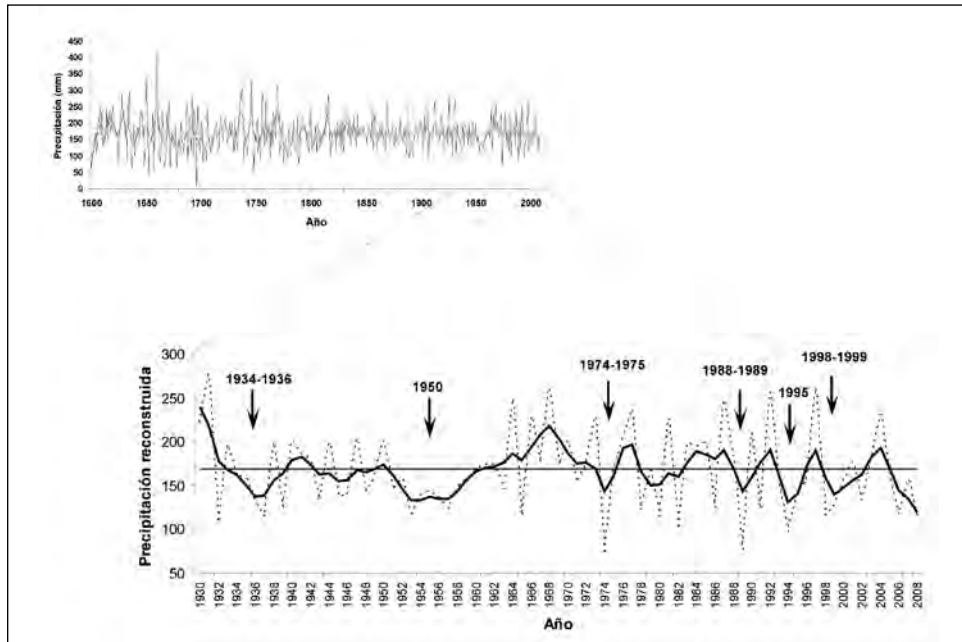


Figura 10. Años La Niña con un impacto negativo en la precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas en los últimos 70 años.

Figure 10. Years when La Niña was seen associated to scarce estimated precipitation at the Nazas river watershed uplands for the last 70 years.

La precipitación en la parte alta de la cuenca disminuyó de manera importante para los periodos 1974 - 1975 y 1988 - 1989, cuya reducción en el primero fue la más intensa en los últimos 250 años (Figura 10). El lapso 1954 - 1956, por su duración, se considera como uno de los eventos La Niña con mayores impactos en la precipitación (Figura 8). De acuerdo con los registros de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) en el intervalo 1950 a 1991, los eventos La Niña de más duración se observaron en los años 1955 - 1956 y 1974 - 1975 (figuras 9 y 10).

Análisis espectral

Mediante el análisis espectral de coherencia de ondeletas se examinó la influencia del ENSO sobre la lluvia para la región alta de la cuenca del río Nazas, al comparar la serie de precipitación reconstruida y los índices del Niño 3.4 (Figura 11).

El espectro de ondeleta para la precipitación reconstruida (Figura 11a) muestra áreas significativas ($p < 0.05$) que corresponden a lapsos de dos años (1905, 1932, 1988 - 1990), de cuatro (1928 - 1932, 1974 - 1976 y 1990 - 1998) y de seis a ocho (1905 - 1930); mientras que, en el espectro de ENSO (Figura 11b) se aprecia su ciclo irregular de dos a siete años para los intervalos 1912 - 1922, 1936 - 1940, 1942 - 1960, 1968 - 1975, and 1978 - 2000. Estos resultados son difíciles de interpretar en el contexto de asociación entre ambas variables; aunque las áreas significativas mencionadas indican períodos de sequía o lluviosos y de ocurrencia o ausencia de ENSO. Así, las situaciones implicadas y la asociación entre estas variables pueden identificarse

interval was an extended La Niña event with deep influence on rainfall (Figure 8). According to the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), La Niña events during 1950 to 1991 occurred during 1955 - 1956, and 1974 - 1975 (Figures 9, 10).

Spectral analysis

Wavelet coherence by means of spectral analysis permitted to assess ENSO influence over rainfall in Nazas river watershed uplands. This analysis compares the reconstructed precipitation series with El Niño 3.4 index (Figure 11).

Wavelet spectrum for reconstructed precipitation (Figure 11a), contains several significative areas ($p < 0.05$) for a recurrence of two years (1905, 1932, 1988 - 1990), four years (1928 - 1932, 1974 - 1976, and 1990 - 1998), and six to eight years (1905 - 1930). On the other hand, ENSO (Figure 11b) displays an unstable cycle of two to seven years at 1912 - 1922, 1936 - 1940, 1942 - 1960, 1968 - 1975, and 1978 - 2000. These are results hard to explain simultaneously for the two variables, even though highly significant areas are pointing to extreme dry or wet years, or ENSO manifestation or absence. Thus, analysis of wavelet coherence (Figure 12) is needed to screen out outstanding cases, and to find cases where the two criteria coincide. Significant areas where precipitation estimates match ENSO 3.4 index during the 19th Century are those occurring within 1 to 30 years frequency.

mediante el análisis de coherencia de ondeletas (Figura 12). Para la centuria de 1900 a 2000, se aprecian áreas significativas de coherencia entre precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4 para frecuencias de 1 a 30 años.

A partir de este análisis es posible discutir y apoyar las siguientes interrogantes: 1) ¿El fenómeno ENSO influye en la variabilidad de la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas? y 2) ¿En qué años y con qué periodicidad?

En la Figura 12 las manchas rojas, delimitadas por una línea negra, indican la presencia de una relación significativa ($p < 0.05$) entre ambas variables. Las flechas horizontales hacia la derecha señalan que ambos fenómenos están en fase o relación positiva y las dirigidas hacia la izquierda que están en antifase o relación negativa. Por su parte, las flechas en posición vertical muestran que los fenómenos están desfasados.

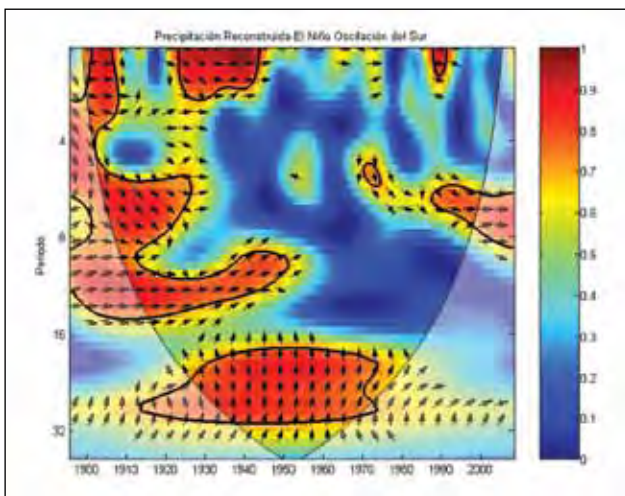


Figura 12. Dominio de coherencia de ondeleta entre la precipitación reconstruida y los índices de ENSO 3.4.
Figure 12. Wavelet coherence dominion relative to reconstructed precipitation series, and ENSO 3.4 index.

Es notable la coherencia significativa entre la precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4 durante el periodo 1900 - 1950 a frecuencias de uno a 14 años, en especial cuando ambos fenómenos coinciden en fase; así como, el de 1986 - 2000 a frecuencias de uno a dos y seis a ocho años. En consecuencia, es probable que los intervalos secos y lluviosos ocurridos de 1900 a 1950 y de 1986 a 2000 en la parte alta de la cuenca del río Nazas hayan sido influenciados, de manera significativa, por la ocurrencia de ENSO en períodos de uno a 14 y seis a ocho años, respectivamente.

De 1970 a 1974, las frecuencias de cinco a seis años indican significancia cuando ambas variables entran en fase. Para estos años el ENSO incidió de modo importante a frecuencias de cinco a seis años. En el lapso de 1951 - 1969 no se aprecia

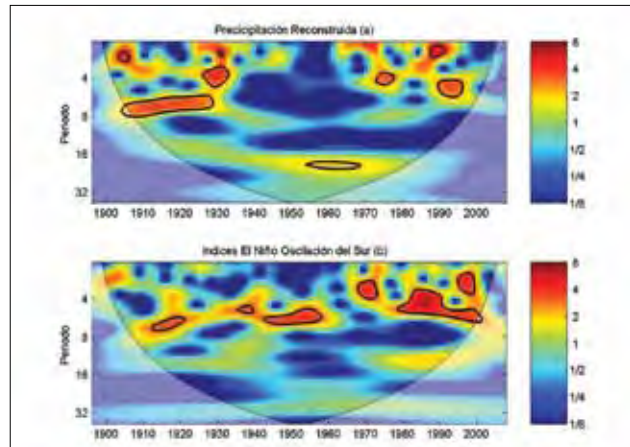


Figura 11. Espectros potenciales de ondeleta a nivel anual de la precipitación reconstruida (a) y El Niño 3.4 (b). Las manchas rojas delimitadas por línea negra son periodos con frecuencias significativas.

Figure 11. Potential wavelet spectrum for estimated annual precipitation (a), and El Niño 3.4 index (b). Red spots enclosed by a black border line identify periods with significant frequency.

This analysis gives ground to pose the following questions: 1) Does ENSO phenomena influence precipitation variability at the uplands of Nazas river watershed?; and if so, 2) when and how often did it?

Black line delimited red zones at Figure 12 signal the existence of a significant relationship ($p < 0.05$) among the two variables. Right pointing arrows denote conditions where the two phenomena are in phase, meaning that they attained a positive relationship. Left pointing arrows indicate that the variables meet in anti-phase, or that they have a negative relationship. Vertical arrows denote combinations where the two phenomena are out of sync.

Coherence among estimated precipitation and ENSO index 3.4 during 1900 - 1950, at intervals of 15 years, is outstanding, and it is clearer when they are in phase. In 1986 - 2000 a similar case developed at frequencies of one, two, and six years. Hence, it seems likely that dry and wet years from the 1900 - 1950, and from 1986 - 2000 periods might have had a connection with ENSO 1 to 14 years, and 6 to 8 years cycles, respectively.

During 1970 to 1974 five to six year frequencies imply both variables behave in synchrony. During this time ENSO tended to return every five to six years. At the protection level of $p < 0.05$, during 1951 to 1969 there was no particular trend seen. If spectral analysis can not resolve any link between ENSO and precipitation in the study area at this time, it is because of the smoothing effect of 16 consecutive years of below average rainfall. These results provide a basis to state that rainfall during the 1950's decade bore no particular influence from ENSO in the study area, regardless of the intense drought registered,

una asociación significativa ($p < 0.05$). Una explicación es que el efecto de dicho fenómeno en modular la precipitación de la década de 1950 no influyó en gran medida para esta parte de la cuenca; no obstante, es un periodo que registra la sequía más importante de los pasados cuatro siglos para esta región del norte de México, debido a los 16 años con precipitaciones menores a la media.

Lo anterior se atribuye a que en la década de 1950 los eventos del ENSO no provocaron disminuciones o incrementos significativos en la precipitación. Por su parte, Trenberth (1997) indica que en ese decenio la presencia de dos de los eventos más intensos del ENSO en su fase fría (La Niña), 1950 - 1951 y 1954 - 1956, propiciaron importantes reducciones en precipitación, que para esta parte del país incidieron en su variabilidad, aunque no de manera significativa.

La presente investigación muestra el potencial de los estudios dendrocronológicos para analizar, desde una perspectiva histórica, el comportamiento y la variabilidad interanual y multiannual de fenómenos atmosféricos circulatorios como el ENSO y sugiere la necesidad de crear cronologías regionales que involucren el mayor número de series de tiempo dendrocronológicas para lograr un mejor conocimiento de este y de otros fenómenos atmosféricos y de sus teleconexiones moduladoras del clima.

CONCLUSIONES

La reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (noviembre-junio), para la parte alta de la cuenca del río Nazas permitió observar y analizar la variabilidad registrada en los cuatro siglos recientes (1599-2008), así como la influencia del ENSO en la precipitación y el impacto en el desarrollo social y económico de La Comarca Lagunera, región que de manera histórica ha dependido de los volúmenes de agua disponibles en dicha cuenca.

La variabilidad de la precipitación reconstruida indica la presencia de sequías severas en los periodos 1665-1688, 1695-1718, 1774-1791, 1798-1813, 1890-1896 y 1945-1963; aunque las más intensas ocurrieron en las décadas de 1780, 1890 y 1950. La peor sequía de los últimos 400 años detectada en la reconstrucción y en registros climáticos para la región ocurrió en la década de 1950. Esta provocó desempleo, migración y movilizaciones campesinas; sin embargo, los problemas económicos y de empleo se acentuaron de modo especial en La Comarca Lagunera, donde, por la insuficiencia de agua, se paralizaron las labores agrícolas, se incrementó la emigración y se inició una lucha campesina que se prolongó hasta principios de 1960.

En la parte alta de la cuenca del río Nazas la precipitación es modulada por ENSO, tanto en su fase fría (La Niña), con intensas

the most severe the North of Mexico has seen in four centuries. This does not mean absence of ENSO events in the 1950's decade, instead, it means that they appeared and did not influence precipitation at all. Trenberth (1997) recalls two ENSO cold phase events, one in 1950 - 1951, and a second in 1954 - 1956. These events coincide with important but not statistically significant decreases in rainfall in this region of the country.

This research attest the high capability of dendrochronological studies to study historic trends and variability in seasonal and multiannual atmospheric circulatory phenomena such as ENSO. Building larger regional dendrochronological series is suggested as a means to study in detail this and similar atmospheric topics, and their ways to modulate climate.

CONCLUSIONS

Reconstruction of winter-spring (November-June) precipitation for the Nazas river watershed uplands permitted an analysis of registered variability of the last four centuries (1599 - 2008), the influence of ENSO on precipitation and its effect on social and economic development at Comarca Lagunera. Comarca Lagunera is a historically important region keenly dependent on its water supply.

Variability of estimated rainfall features recurrent drought periods such as 1665 - 1688, 1695 - 1718, 1774 - 1791, 1798 - 1813, 1890 - 1896, and 1945 - 1963. The most intense dry years happened in the decades of 1780, 1890, and 1950. The latter event caused considerable unemployment, migration, and political protests. Jobs lost and other economic problems were more intense at Comarca Lagunera because water scarcity damped agricultural activities, increased migration, and that led to peasant upheaval lasting into the early 1960's.

Rainfall on Nazas river watershed uplands is modulated by ENSO, both in its cold phase (La Niña), causing intense drought, and in the warm phase (El Niño), causing above average rainfall. During 1974-1975, and 1988-1989 ENSO cold phase produced a record drop in rainfall, the most intense in 250 years. ENSO in warm phase showed up in 1987, 1992, and 1997, followed by important increases in precipitation.

Rebuilt precipitation series relationship to ENSO 3.4 index can be displayed as wavelet coherence plots studied through spectral analysis. Output indicates that during the 20th Century ENSO significantly ($p < 0.05$) affected rainfall variability in frequencies between 1 and 14 years. During 1986 - 2000 ENSO occurred with a one, two, and six years frequency.

ENSO explains precipitation variability in northern Mexico. This capability suggests the convenience of further research extending to other regions and seeking explanations about short

sequías, como en su fase cálida (El Niño), que propicia incrementos en la lluvia de la región. En los periodos 1974 - 1975 y 1988 - 1989 la fase fría de ENSO originó una disminución de la precipitación a un nivel sin precedente en los últimos 250 años. De igual manera, en los años de 1987, 1992 y 1997 la fase cálida de ENSO propició importantes aumentos en la precipitación.

El análisis espectral de coherencia de ondeleta para las variables precipitación reconstruida e índices de ENSO 3.4 en los 100 años recientes (1900 - 2000) indicó que durante el intervalo 1900 - 1950 el ENSO incidió de forma significativa ($p < 0.05$) en la variabilidad de la lluvia a frecuencias de uno a 14 años y de 1986-2000 a frecuencias de uno a dos y de seis a ocho años.

El fenómeno ENSO explica la variabilidad de la precipitación en el norte de México, hecho que fundamenta la sugerencia de ampliar este tipo de estudios a otras regiones y analizar las teleconexiones y el impacto potencial a corto y mediano plazo que pudiera tener este fenómeno en la disponibilidad de los recursos hídricos, en particular, al considerar su variabilidad en el tiempo y las modificaciones que el calentamiento global pudiera ejercer en su comportamiento.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento otorgado por los fondos SEP-CONACYT a través del proyecto "Estudio de la relación clima-incendios en el norte-centro de México" y el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático (IIA) por medio del proyecto CRN # 2047 "Documentación, entendimiento y proyección de los cambios en el ciclo hidrológico en la cordillera americana".

REFERENCIAS

Brouste, L. 1997. Hydrochimie et Géochimie isotopique de la nappe phréatique de la Comarca Lagunera (Nord-Mexique). Thèse doctoral. Université de Paris XI. Orsay, France. 227 p.

Caso, M., C. González-Abraham and E. Ezcurra. 2007. Divergent ecological effects of oceanographic anomalies on terrestrial ecosystems of the Mexican Pacific coast. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 104:10530-10535.

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, México. *Madera y Bosques*. 15 (2):27-44.

Cerano-Paredes, J., J. Villanueva-Díaz, R. D. Valdez-Cepeda, E. H. Cornejo-Oviedo, I. Sánchez-Cohen y V. Constante-García. 2011. Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Rev. Mex. Cien. For.* 2 (4):33-46.

Cleaveland, M. K., E. R. Cook and D. W. Stahle. 1992. Secular variability of the ENSO signal detected in tree-ring data from Mexico and the southern United States. In: Diaz, H. F. and Markgraf (Eds.). *Historical and paleoclimatic aspects of the southern oscillation*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. pp. 271-291.

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(3):369-388.

and medium range availability of usable water resources, their time variability, and their changes due to global warming.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research received financial support from SEP-CONACYT, through project "Estudio de la relación clima-incendios en el norte-centro de México", and from Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático (IIA) funding project CRN # 2047 "Documentación, entendimiento y proyección de los cambios en el ciclo hidrológico en la cordillera americana".

End of the English version

Cook, E. R. and K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring with 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.

Descroix, L., J. F. Nouvelot y J. Estrada. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. INIFAP-ORSTOM. Gómez Palacio, Dgo. México. Folleto Científico No. 8. 52 p.

Descroix, L., J. L. González B. y J. Estrada A. 2004. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. INIFAP-IRD. Gómez Palacio, Dgo. México. 300 p.

Díaz-Castro, S., M. D. 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, México, D. F. México. 123 p.

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

Fritts, H. C. 1976. *Tree-rings and climate*. Academic Press. 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.

Fritts, H. C. 1999. An empirical model of the tree-ring response to monthly variations in climate. Laboratory of Tree-Ring Research University of Arizona. Tucson, AZ, USA. 6 p.

Fritts, H. C. 2001. *Tree-rings and climate*. Blackburn Press. Caldwell, NJ, USA. 567 p.

García-Arévalo, A. y M. S. González-Elizondo. 1998. *Panaceas de Durango*. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Ver. México. 179 p.

González B., J. L. 1992. *Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine; exemple dans La Comarca Lagunera*. Thèse doctoral. Université de Montpellier Montpellier, Hérault. France. 316 p.

Grissino-Mayer, H. D. 1995. *Tree-ring reconstruction of climate and fire history at El Malpais National Monument, New Mexico*. Ph.D. Dissertation. The University of Arizona. Tucson, AZ, USA. 407 p.

Grissino-Mayer, H. D. 2001. FHX2-software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree-Ring Research*. 57: 115-124.

Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*. 43:69-78.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2000. *Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC)*. Software. Jiutepec, Morelos, México. s/p.

- Inard, L. B. 2004. ¿Una montaña en vías del abandono? *In*: Descroix, L., J. L. González B. y J. Estrada A. (Eds). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. INIFAP - IRD. Gómez Palacio, Dgo. México. pp. 65-83.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1980. Serie de mapas de hidrología superficial, escala 1:250000. Aguascalientes, Ags. México.
- Loyer, J. Y., J. Estrada, R. Jasso y L. Moreno (Eds). 1993. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36. INIFAP, CENID-RASPA, ORTSOM. Gómez Palacio, Dgo. México. 367 p.
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez. 1999. Los impactos del Niño en México. Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D. F. México. 229 p.
- Magaña V., O., J. L. Vázquez, J. L. Pérez and J. B. Pérez. 2003. Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42:313-330.
- MathWorks. 2002. Software matemático. MATLAB Versión 6.5.
- Purca S., R. 1999. El evento La Niña en la costa Peruana. *In*: Memorias del VIII Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar. 17-21 de octubre. Trujillo, La Libertad, Perú. 2:707.
- Rigal, G. 1988. Etude du problème de l'irrigation dans une région agricole du centre nord du Mexique. Mémoire de DAA, Institut National Agronomique de Paris-Grignon. Paris, France. 100 p.
- Robinson, W. J. and R. Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*. 40:59-64.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1970. Boletín hidrológico 2(35). México, D. F. México. s/p.
- Stahle, D. W. and M. K. Cleaveland. 1988. Texas drought history reconstructed and analyzed from 1698 to 1980. *Climate* 1:59-74.
- 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., R. D. 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. 10th Conference of Global Change Studies. American Meteorological Society, 79th Annual Meeting. January 10-15. Dallas, TX USA. pp. 205-211.
- Stat soft Inc. 2000. STATISTICA Kernel release 5.5 A Copyright © 1984-2000.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago, IL USA. 73 p.
- Swetnam, T. W., M. A. Thomson and E. K. Sutherland. 1985. Using dendrochronology to measure radial growth of defoliate trees. USDA-Forestry Service. Agriculture Handbook Tucson, AZ, USA. 639. 36 p.
- Trenberth, K. E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78:2771-2777.
- Villanueva-Díaz, J., B. H. Luckman, D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, J. Cerano-Paredes, G. Gutiérrez-García, J. Estrada-Avalos and R. Jasso-Ibarra. 2005. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrochronologia* 22(3):215-223.
- 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 P., J. Estrada A. e I. Sánchez C. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Rev. Cien. For. Méx.* 34 (105):37-69.