

# RECONSTRUCCIÓN DE PRECIPITACIÓN ESTACIONAL PARA EL NOROESTE DE GUANAJUATO

## SEASONAL PRECIPITATION RECONSTRUCTION FOR NORTHWESTERN GUANAJUATO

Eunice Nayeli Cortés Barrera<sup>1</sup>, José Villanueva Díaz<sup>2</sup>, Cecilia Nieto de Pascual Pola<sup>3</sup>, Juan Estrada Ávalos<sup>2</sup> y Vidal Guerra de la Cruz<sup>4</sup>

### RESUMEN

Los anillos de árboles constituyen una fuente de información de alta resolución que permite extender la información climática en sitios donde los registros documentales son escasos. Se obtuvieron núcleos de crecimiento de *Pinus cembroides* en el noroeste del estado de Guanajuato y se generaron dos cronologías de ancho de anillo para sitios en los municipios de Ocampo y San Felipe. El análisis de regresión determinó que las cronologías no poseen variabilidad común ( $p < 0.05$ ), por lo que se crearon dos cronologías por separado, una de 223 años (1790 a 2007) para el sitio de Ibarra y otra de 158 años (1850 a 2007) para Las Palomas del Cubo. El análisis de calibración entre los índices dendrocronológicos y las precipitaciones estacional y anual procedente de estaciones climáticas aledañas a la ubicación de las cronologías, indicó una respuesta significativa ( $p < 0.05$ ) y explicó 51% y 48% de la variabilidad de precipitación, respectivamente. La sequía reconstruida más intensa se registró en 1999 para la cronología de Ibarra y en 1956 y 2006 para la cronología de Las Palomas. Entre los eventos húmedos donde ocurrieron inundaciones severas destacan las del período 1785 a 1788 en Ibarra y en los años 1865, 1871, 1877, 1941, 1966 - 1967 y 1980 en Las Palomas. El efecto de patrones circulatorios no mostró una influencia significativa en la precipitación, excepto cuando se tuvo la presencia de Niños muy intensos. Para un mejor entendimiento de este fenómeno, se recomienda ampliar la red de cronologías de anillos de árboles en esta región de Guanajuato.

**Palabras clave:** Anillos de crecimiento, Guanajuato, inundaciones, *Pinus cembroides* Zucc., reconstrucción de precipitación, sequías.

### ABSTRACT

Tree rings constitute a high resolution proxy of climate and precipitation reconstructions can extend back in time instrumental climate records. Therefore, increment cores were collected from two populations of *Pinus cembroides* in the northwestern region of the state of Guanajuato and generated two ring-width chronologies for Ocampo and San Felipe municipalities. A correlation analysis determined that time series did not have common variance, thereby two single chronologies were produced, one of 223 years (1790 to 2007) for Ibarra site, and the other one, of 158 years (1850 to 2007), for Las Palomas del Cubo. The calibration analysis between the seasonal and annual precipitation indicated a significant response ( $p < 0.05$ ) and accounted for 51% and 48% of the total precipitation variability, respectively. The most intense drought was detected in 1999 for the Ibarra chronology and 1956 and 2006 for Las Palomas chronology. Wet episodes produced severe flooding problems from 1785 to 1788 in Ibarra and in the years 1865, 1871, 1877, 1941, 1966-1967 and 1980 in Las Palomas. The effect of circulatory patterns showed no significant influence, except during very strong ENSO events. Therefore, it is recommended to expand the network of tree ring chronologies in this region in order to improve the analysis of the impact of this atmospheric circulatory pattern.

**Key words:** Tree rings, Guanajuato, floods, *Pinus cembroides* Zucc., precipitation reconstruction, drought.

Fecha de recepción: 5 de abril de 2011.

Fecha de aceptación: 31 de enero de 2012.

<sup>1</sup> Becaria del Laboratorio de Dendrocronología en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA), INIFAP. Correo-e:nayeligoba@yahoo.com.mx

<sup>2</sup> Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA), INIFAP.

<sup>3</sup> Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF), INIFAP.

<sup>4</sup> Campo Experimental Tlaxcala, CIR-Centro, INIFAP.

## INTRODUCCIÓN

El estado de Guanajuato debe su origen a la riqueza mineral de su territorio, factor fundamental que históricamente contribuyó al establecimiento de importantes asentamientos humanos, particularmente durante la época colonial; los cuales con el devenir del tiempo se transformaron en grandes núcleos de población con altas demandas de bienes y servicios, entre ellos los recursos hídricos, para fines de producción agrícola, industrial y de consumo humano.

La limitada cantidad de agua con la que cuenta el estado de Guanajuato y el incremento poblacional e industrial que ha experimentado en las últimas décadas, ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos existentes, lo que ha propiciado serios problemas de abastecimiento de agua, decremento en su calidad, presencia de metales pesados y asentamientos de suelo, entre otros problemas colaterales (CONAGUA, 2007).

Para alcanzar a comprender las implicaciones de esta situación, se debe hacer una recapitulación en términos ambientales de lo ocurrido en la cuenca Lerma Chapala, que integra parte de los estados de Guanajuato, México, Jalisco, Michoacán y Querétaro. Esta cuenca es una de las más extensas pero con más aprovechamiento y degradación de sus recursos hidráulicos en México, ya que en ella se concentra 15.6% de la población nacional (INEGI, 1998; CONAGUA, 2007). Durante los últimos 50 años, la cuenca Lerma Chapala ha experimentado una transformación dinámica, debido a la creación de distritos de riego, que utilizan más del 85% del volumen de agua disponible en esta región y de la conformación de un eje industrial que vincula sus poblaciones con los afluentes y a lo largo del cauce principal del río Lerma, para unir finalmente a las ciudades de México y de Guadalajara, dos de los polos de desarrollo industrial de mayor auge económico del país.

Esta política de desarrollo, se fincó en un aprovechamiento intensivo de sus recursos naturales, lo que propició a través del tiempo, el grado de deterioro que presenta actualmente esta cuenca. Prueba de lo anterior es que en el período 1976 - 2000, las selvas decrecieron en una superficie de 75,400 ha y los bosques en 115,100 ha y se incrementó el área de cultivo, pastizales inducidos, bosques secundarios y áreas urbanas (Instituto Nacional de Ecología, 2003). Así mismo, se produjo una reducción de 9,700 ha en cuerpos de agua, que aunado a problemas de erosión hídrica en 27% de la superficie de las cuencas, impactó severamente el ciclo hidrológico, al reducir la infiltración, favorecer el escurrimiento superficial y reducir la fertilidad de los suelos.

En este contexto, el conocimiento histórico de la variabilidad hidroclimática en Guanajuato es fundamental para determinar

## INTRODUCTION

The state of Guanajuato owes its origin to the mineral wealth of its territory, a key factor that historically contributed to the establishment of important settlements, particularly during the colonial era, which over time, became major population centers with high demands of goods and services, including water resources for agricultural, industrial and human consumption purposes. The limited amount of available water, as well as the population and industrial growth the state has experienced in recent decades has led to overexploitation of aquifers, which has resulted in serious problems regarding water supply, like a decrease in quality, presence of heavy metals and soil settlements, among other related problems (CNA, 2007).

To fathom the implications of this situation, an environmental recap should be done about what happened in the Lerma-Chapala basin, which occupies territory of Guanajuato, Mexico, Jalisco, Michoacan and Queretaro states. The basin in question is one of the largest in Mexico, but it also has a high level of exploitation and degradation of its water resources, since it holds 15.6% of the national population (INEGI, 1998; CNA, 2007). During the past 50 years, this area has had a dynamic transformation, due to the creation of irrigation districts that consume more than 85% of the volume of water available in the region and the formation of an industrial hub, linking their communities with both, the tributaries and along the main channel of Lerma river, to unite Mexico City and Guadalajara, two of the economic and industrial development poles in the country.

A policy based on the intensive use of natural resources led, over time, to the degree of deterioration in which the Lerma-Chapala basin currently is. Proof of this is that in the period of 1976 - 2000, the tropical forest area decreased 75,400 ha and the forest area 115,100 ha, against an increment of croplands, induced grasslands, secondary forests and urban areas (INE, 2003). Also, there was a reduction of water bodies of 9,700 ha, which coupled with erosion problems in 27% of the area, severely impacted the hydrological cycle by reducing infiltration, allowing runoff and reducing soil fertility.

In this context, the historical knowledge of hydroclimatic variability in Guanajuato is essential for determining its fluctuation over time, analyzing events of high and low frequency and their possible long-term tendencies. A study of climate variability based only on data from weather stations provides a distorted view of climate fluctuation over time, as these climate records are limited by their short time range, usually no more than 70 years, their questionable quality, inconsistency of information and missing data, which severely restricts their use for weather analysis.

su fluctuación en el tiempo, analizar eventos de alta y baja frecuencia y sus posibles tendencias a largo plazo. Un estudio de la variabilidad del clima fundamentado tan sólo en registros de estaciones meteorológicas, proporcionará una idea distorsionada de la fluctuación climática en el tiempo; debido a que estos registros climáticos tienen la limitante de su corta extensión, generalmente no mayor de 70 años, calidad dudosa, incongruencia en sus registros y presencia de datos perdidos, situación que limita seriamente un análisis confiable de su variabilidad histórica.

Por otra parte *P. cembroides* Zucc. es una especie nativa de México y de los pinos de mayor distribución en el país. Su fenología está influenciada por las condiciones y características climáticas y edáficas de los lugares en los que se desarrolla; tolera fuertes sequías, heladas y temperaturas extremas (Martínez, 1948; Eguluz, 1982), características que la hacen una especie con alto potencial adaptativo y por desarrollar anillos de crecimiento de carácter anual, permite realizar estudios dendrocronológicos (Constante *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2010).

Con base en lo anterior, se plantearon los siguientes objetivos: determinar la variabilidad hidroclimática histórica en el noreste del estado de Guanajuato mediante reconstrucciones paleoclimáticas desarrolladas a través de la generación de cronologías de anillos de árboles de *P. cembroides*; y analizar el impacto que patrones de circulación general como El Niño Oscilación del Sur han tenido en la variabilidad de la precipitación y de su influencia a través del tiempo en esta región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la región noroeste del estado de Guanajuato se ubicaron dos rodales de pino piñonero en los municipios de Ocampo en los sitios denominados Ibarra (IBA), localizado a una latitud de 21.41° N, longitud oeste de 101.52° y elevación de 2,300 m y en Las Palomas del Cubo (PAL), San Felipe, Guanajuato, ubicado en las coordenadas 21.44° de latitud norte, 101.05° de longitud oeste y 2,300 m de elevación (Figura 1).

Con ayuda de un taladro de Pressler, marca Haglof, de 50.8 cm de longitud, diámetro interno de 5.15 mm y de 2 a 3 cuerdas, se extrajeron tres núcleos de crecimiento o virutas de 60 especímenes seleccionados de pino piñonero. Las muestras obtenidas se identificaron y montaron en secciones acanaladas de madera para posteriormente ser pulidas con lijas en un grado progresivo de grueso a fino.

En el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP, con apoyo de un estereoscopio trinocular de alta resolución (100-200) modelo SZ2-ILSI marca Olympus Corporation, se contaron y fecharon los anillos de crecimiento al año exacto de su formación (Stokes y Smiley, 1968). Posteriormente se midió el ancho de

*Pinus cembroides* Zucc. is native to Mexico and is one of the most widely distributed pine species in the country, as it has spread because of its ornamental qualities and to meet reforestation needs. Its phenology is influenced by climatic conditions and soil characteristics from the places where it grows; it can tolerate severe drought, frost and extreme temperatures (Martínez, 1948; Eguluz, 1982), making it a good choice for its high adaptive potential. It forms annual tree rings that allow dendrochronological studies to be done (Constante *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2010).

Based on the former statements, the following objectives were proposed: to determine the historical hydroclimatic variability in the northwest of the state of Guanajuato using paleoclimatic reconstructions obtained through the generation of tree-ring chronologies of *Pinus cembroides* and to analyze the impact that general circulation patterns such as El Niño Southern Oscillation have had on the variability of precipitation and its influence over time in this region.

## MATERIALS AND METHODS

In the northwest region of the of Guanajuato State, two stands of *Pinus cembroides* (stone pine) were placed: the first one, Ibarra (IBA), in Ocampo municipality, which is located at 21°41'N and 101°52'W and an altitude of 2,300m; and the second, Las Palomas del Cubo (PAL), in San Felipe municipality, between 21°44' N, 101° 05' W and 2,300 m high (Figure 1).

With a Pressler drill (Haglof, 50.8 cm long, internal diameter of 5.15 mm and 2 to 3 strings), three growth cores of 60 specimens of *P.cembroides* were extracted and selected for their longevity and lack of apparent damage. Samples were identified and assembled in specially designed grooved wood structures to later be sanded in a progressive degree from coarse to fine.

In the Dendrochronology Laboratory of INIFAP, tree rings were counted and dated to the exact year of their formation (Stokes and Smiley, 1968) with an Olympus SZ2-ILSI trinocular stereoscope of high-resolution (100 - 200). Next, total ring width was determined with a VELMEX measuring system and the resulting information was verified using the COFECHA program (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Biological and geometric tendencies unrelated to weather were removed with the ARSTAN program by inserting a negative exponential curve or straight line to the series of measurements and then dividing each of the values by those obtained from the curve (Cook, 1987).

To determine the influence of climate on the growth of the selected species, the stations closer to the collection sites were located by the ERIC climate base (IMTA, 1997) (Figure 1, Table 1).

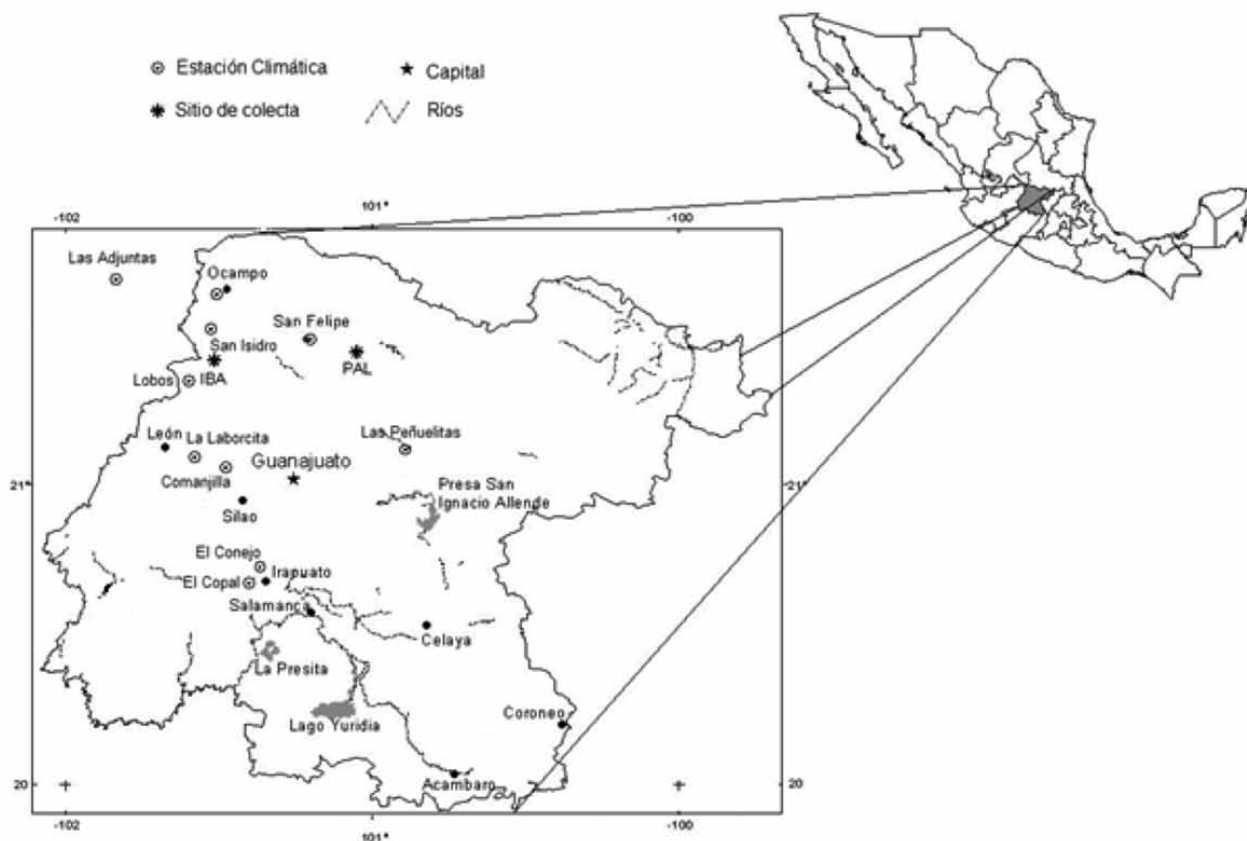


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo y estaciones climáticas utilizadas para generar una base de datos de precipitación para los sitios de muestreo.

Figure 1. Geographical location of sampling sites and weather stations used to generate a database of precipitation for the sampling sites.

anillo total con un sistema de medición VELMEX, información que se verificó mediante el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con clima se removieron con el programa ARSTAN, al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y posteriormente dividir cada valor anual de medición, entre el valor obtenido de la curva (Cook, 1987).

Para determinar la influencia del clima en el crecimiento del pino piñonero se ubicaron aquellas estaciones más cercanas a los sitios de colecta, para lo cual se utilizó la base climática ERIC (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1997) (Figura 1, Cuadro 1).

Posterior al fechado de las series de crecimiento, uno de los problemas para generar series dendrocronológicas con la mayor señal climática posible es la remoción del crecimiento atribuido a la edad y a un área de fuste (tronco) cada vez mayor, proceso conocido como estandarización, cuya función es transformar las series de ancho de anillos en series estacionarias, adimensionales y comparables entre sí. Estas series o índices tendrán una media de 1.0 y varianza relativamente constante (Fritts, 1976).

After dating the growth series, one of the problems to generate dendrochronological series with the highest possible climate signal is the removal of the growth attributed to age and an area of stem that gets larger over time, a process known as standardization, whose function is to transform series of ring width in stationary time series, dimensionless and comparable between each other. These, also called indexes have a mean of 1.0 and a relatively constant variance (Fritts, 1976).

ARSTAN, a program often used to standardize growth series (Cook, 1987), was used in this study. Its function is to produce chronologies of tree ring series through the tendency removal process, which implies that mathematical models are attached to the growth series: negative exponential curve, flexible curve, straight line with positive tendency, negative, horizontal, etc., to finally produce dendrochronological indexes, which result from the division between the measured value and the derivative of the fitted curve. In the case of using logarithms to stabilize the variance, indexes are obtained by subtraction (Delgado, 2000).

A flexible decadal curve was adjusted to the dendrochronological series, to highlight flexible low-frequency events, in particular, wet or dry periods (Cook and Peters, 1981),

Uno de los programas de mayor uso para la estandarización de series de crecimiento es el programa ARSTAN (Cook, 1987). La función de este programa es producir cronologías de series de anillos de crecimiento a través del proceso de eliminación de tendencias, que implica que a las series de crecimiento se les fijan modelos matemáticos, como el de una curva exponencial negativa, curva flexible, línea recta con tendencia positiva, negativa, horizontal, etc., para finalmente derivar en índices dendrocronológicos, que resultan de la división entre el valor de medición y el derivado de la curva ajustada, pero en el caso de utilizar logaritmos para estabilizar la varianza, los índices se obtienen mediante sustracción (Delgado, 2000).

Después a las series dendrocronológicas, se les ajustó una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia, en particular, períodos húmedos o secos (Cook y Peters, 1981).

Los índices dendrocronológicos se compararon entre sitios para un período común 1917 - 2000 y para subperíodos de 20 años. Estas comparaciones permitieron analizar semejanzas y discrepancias entre cronologías y su comportamiento en el tiempo.

La respuesta climática entre precipitación y crecimiento anual se analizó con un Análisis de Función de Respuesta (RESPO, por sus siglas en inglés). Los datos climáticos disponibles se calibraron con VERIFY (Fritts, 1991). Finalmente se obtuvo una ecuación de transferencia para desarrollar la reconstrucción de precipitación.

Con las series de tiempo producidas e información climática instrumental, se generaron reconstrucciones históricas de precipitación, con las que se analizó la variabilidad hidroclimática regional, su comportamiento histórico y sus tendencias a largo plazo, información que es importante para el manejo y planeación actual y futuro del uso del agua en la región. La serie de alta frecuencia (resolución anual) se ajustó con una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia a nivel decenal como son períodos secos o húmedos (Cook y Peters, 1981).

La variabilidad hidroclimática detectada se correlacionó con índices de patrones de circulación atmosférica global y se determinó la influencia de los mismos en la región. Esta información es de gran relevancia científica, ya que actualmente el fenómeno ENSO tiene cierta predictibilidad debido a que en el Pacífico Ecuatorial se realiza actualmente el monitoreo continuo de este sistema meteorológico mediante boyas e imágenes de satélite (TAO, 2010), con lo que es posible determinar el grado de afectación de este fenómeno en la región; situación que constituye una ventaja para fines de planeación del uso de los recursos hídricos, particularmente en áreas con temporal deficiente, donde el porcentaje de siniestralidad de los cultivos establecidos para el período 1980 - 2005 fue

and sites were compared for a common period (1917 - 2000) and sub-periods of 20 years. These comparisons made possible to analyze similarities and differences between chronologies and their behavior over time.

The climate response to the case of precipitation and annual growth was revised with a Response Function Analysis (RESPO). Climate data available was calibrated with VERIFY (Fritts, 1991). At last, a transfer equation for the reconstruction of precipitation was generated.

With the time series produced and instrumental climate data, historical reconstructions were developed, with which the regional hydroclimatic variability was analyzed, its historical performance and its long-term tendencies, which are important for managing and planning current and future use of water in the region. The series of high frequency (annual resolution) was fitted with a flexible decadal curve to highlight low frequency events, such as dry or wet periods (Cook and Peters, 1981).

The hydroclimatic variability detected was correlated with indexes of global atmospheric circulation patterns and their influence on the area was examined. This information has great scientific relevance since at present, ENSO has some predictability as in the Equatorial Pacific a continuous monitoring of this meteorological system is being carried out by means of buoys or satellite images (TAO, 2010), with which it is possible to determine the affectation degree of this phenomenon in the region, situation that it advantage for planning endings in the use of hydrological resources, particularly in areas of inefficient rains, where the crop destruction per cents that were established during the 1980-2005 period was near 100,000 hectares, which means 27 % of the annual cultivated land in Guanajuato State (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 2006).

Dry and wet periods detected in the reconstructions were compared with historical data and with the dry and wet periods observed in various dendroclimatic reconstructions developed for other regions of the country. This statement was based in the fact that climatic phenomena of great intensity affect great areas of Mexico and even may cross borders (Fritts, 1991; Cook *et al.*, 2007; Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2009). The knowledge of these events is an indication of the magnitude and the social and economic impact that they can exert on society.

## RESULTS AND DISCUSSION

Two reconstructions of precipitation with the nuclei for growth of *Pinus cembroides* were developed for the northwest region of Guanajuato, one of them was Ibarra. To compare this chronology with climate data, a regional station of precipitation

cercano a 100,000 ha, lo que representa 27% de la superficie anualmente cultivada en el estado de Guanajuato (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 2006).

Los períodos secos y húmedos detectados en las reconstrucciones, se cotejaron con datos históricos documentados, así como con períodos secos y húmedos observados en diversas reconstrucciones dendroclimáticas desarrolladas para otras regiones del país. Esta aseveración se fundamentó en el hecho, de que fenómenos climáticos de gran intensidad afectan amplias áreas de México e inclusive pueden traspasar fronteras (Fritts, 1991; Cook *et al.*, 2007; Seager *et al.*, 2009, Stahle *et al.*, 2009). El conocer la cobertura de estos eventos es un indicio de la magnitud y del impacto social y económico que pueden ejercer en la sociedad.

was assembled composed of the weather stations at Laborcita, Comanjilla, El Conejo and El Copal. The standard version of the total ring chronology responded significantly ( $r = 0.7$ ,  $p < 0.0001$ ,  $n = 223$ ) to the annual precipitation of the spring-summer period (March-September) (Figure 2).

The calibration process between dendrochronological indexes and seasonal precipitation data was significant ( $r^2 = 0.51$ ,  $p < 0.0003$ ) and regression analysis between both variables for the 1977 - 2004 period showed high reliability for reconstruction purposes (Table 2).

Cuadro 1. Estaciones climáticas consideradas para generar una base de datos de precipitación regional para los sitios muestreados. Table 1. Climatic stations considered for generating a database of regional precipitation of the sampled sites in the state of Guanajuato.

Estación climática	Clave <sup>1</sup>	Ubicación		
		Longitud (Grados)	Latitud (Grados)	Altitud (msnm)
Ocampo, Ocampo	IBA	-101.51	21.63	1,238
Comanjilla, Silao	IBA	-101.48	21.06	1,930
La Laborcita, León	IBA	-101.60	21.10	2,419
El Copal, EAZ Irapuato	IBA	-101.40	20.68	1,750
El Conejo, Irapuato	IBA	-101.37	20.73	1,720
San Pedro de los Almoloya	PAL	-101.23	21.60	---
San Felipe, San. Felipe DGE	PAL	-101.20	21.48	2,100
Lobos, San Felipe	PAL	-101.61	21.35	1,834
Las Peñuelitas, D. Hidalgo	PAL	-100.88	21.11	1,850
San Isidro, Ocampo	PAL	-101.53	21.51	2,125

<sup>1</sup>IBA = Ibarra, Ocampo; PAL: Palomas del Cubo, San Felipe; Guanajuato

<sup>1</sup>IBA: Ibarra, Ocampo municipality; PAL: Las Palomas del Cubo (PAL), San Felipe municipality

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se desarrollaron dos reconstrucciones de precipitación con núcleos de crecimiento de pino piñonero para el noroeste de Guanajuato, una de ellas es del sitio Ibarra en el municipio de Ocampo, Guanajuato. Para comparar esta cronología con datos climáticos, se conformó una estación regional de precipitación compuesta por las estaciones climáticas Laborcita, Comanjilla, El Conejo y el Copal. La versión estándar de la cronología de anillo total, respondió significativamente ( $r=0.7$ ,  $p<0.0001$ ,  $n=223$ ) a la precipitación anual de la estación primavera-verano (marzo-septiembre) (Figura 2).

The linear model generated for reconstruction purposes was the following:

$$Y_i = 379.17 + 261.97 * X_i$$

Where:

$Y_i$  = Value of the reconstructed precipitation for the March to September period on a specific year (mm).

$X_i$  = Total ring index for the year of the reconstruction.

After applying the model, a reconstruction that spans 208 years (1790 - 2007) was obtained. It includes the accumulated precipitation from March to September, a period that has the

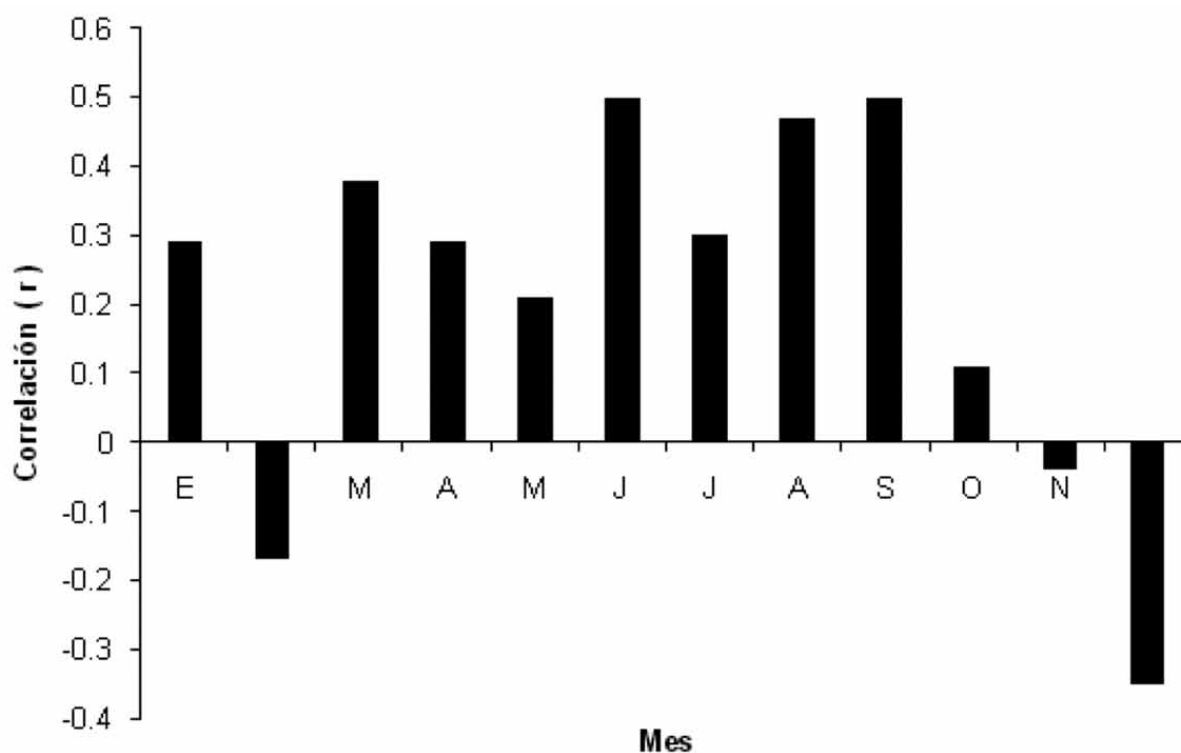


Figura 2. Correlación entre los índices dendrocronológicos de ancho de anillo total y registros de precipitación promedio de estaciones aledañas al sitio de colecta Ibarra, Guanajuato.

Figure 2. Correlation of total ring width dendrochronological indexes and average precipitation records from stations surrounding Ibarra collection site, Guanajuato.

Cuadro 2. Análisis de regresión entre los índices dendrocronológicos de pino piñonero en el sitio Ibarra, Guanajuato y la precipitación acumulada estacional marzo-septiembre del período 1977 - 2004.

Table 2. Regression analysis between the dendrochronological indexes of *Pinus cembroides* in the Ibarra, site and seasonal cumulative precipitation from March to September for the 1977 - 2004 period.

Periodo	R <sup>2</sup>	Coeficientes	Error estándar	Prueba de "t"	Probabilidad
1977 - 2004	0.51	379.1596	51.64162	7.342132	0.000000
		261.9748	52.14363	5.024098	0.000039

El proceso de calibración entre los índices dendrocronológicos y los datos estacionales de precipitación fue significativo ( $r^2=0.51$ ,  $p<0.0003$ ) y el análisis de regresión entre ambas variables para el período 1977 - 2004 mostró alta confiabilidad con fines de reconstrucción (Cuadro 2).

El modelo lineal generado para propósitos de reconstrucción fue el siguiente:

$$Y_i = 379.17 + 261.97 * X_i$$

Donde:

$Y_i$  = Valor de la precipitación reconstruida para el periodo marzo-septiembre de un año específico (mm).

$X_i$  = índice de anillo total para el año en que se realiza la reconstrucción.

highest amount of precipitation in the year, and is fundamental for the establishment of temporary crops, aquifer recharge and forage production. The reconstructed precipitation variability is shown in Figure 3, where the gray line corresponds to the values accumulated from March to September for a specific year, the dark line is a flexible curve to highlight events by the decade, the broken line is the number of radios used for obtaining the indexes in a given year and the horizontal line is the average of the reconstructed precipitation.

The reconstructed seasonal period represents 87% of the total annual precipitation that occurs in the region; therefore, it is representative of the precipitation that characterizes the northwest Guanajuato state and is a good indicator of the historical hydroclimate variability over the past 200 years.

Al aplicar el modelo se obtuvo una reconstrucción que se extiende por 208 años (1790 - 2007) e incluye la precipitación acumulada de los meses marzo-septiembre, período en el que se tiene la mayor precipitación durante el año y que es fundamental para el establecimiento de cultivos de temporal, recarga de acuíferos y producción forrajera con fines ganaderos. La variabilidad de la precipitación reconstruida se encuentra representada en la Figura 3.

El período estacional reconstruido constituye el 87% de la lluvia total anual que acontece en la región y por ende es representativa de la precipitación que caracteriza a la región

The chronology of *Pinus cembroides* in the Las Palomas del Cubo site, San Felipe municipality, near the Sierra del Cubo, showed a different behavior from the chronology of the Ibarra, considering that both of them are close to each other. For comparison purposes, an integrated regional weather station was composed, involving the stations of San Pedro Almoloya, Peñuelitas, Lobos, San Isidro, and San Felipe Ocampo. A significant correlation ( $r = 0.70$ ,  $p < 0.01$ ) between the standard version of the chronology and the total annual precipitation for the 1979 - 2003 period was found. Based upon this comparison, a linear equation for reconstruction was generated, which was significant ( $p < 0.01$ ) (Table 3).

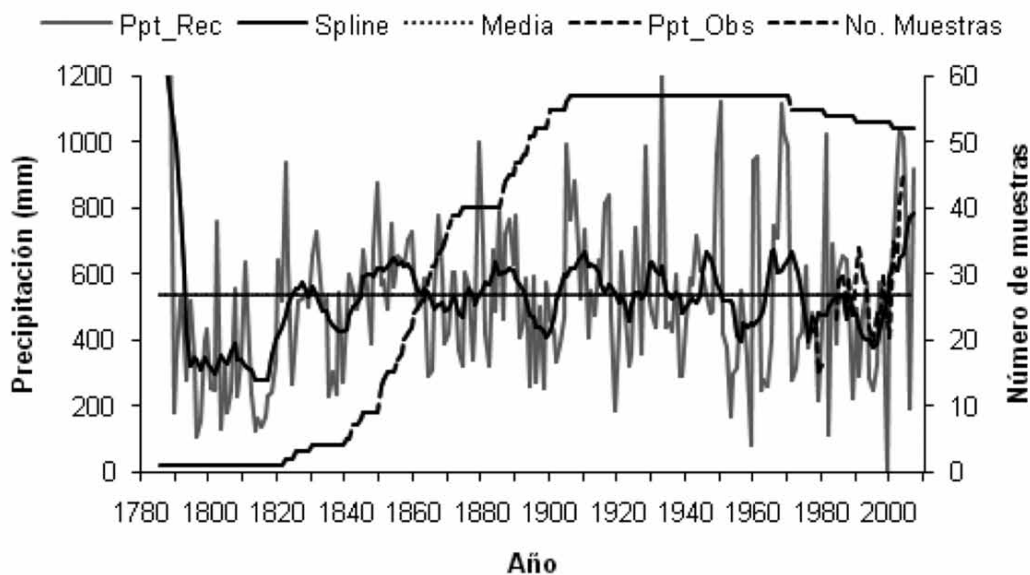


Figura 3. Precipitación estacional reconstruida marzo-septiembre. La línea gris representa los valores acumulados de precipitación durante los meses de marzo a septiembre para un año específico; la línea oscura es una curva flexible para resaltar eventos a nivel década; la línea quebrada constituye el número de radios utilizados para obtener los índices en un año determinado y la línea horizontal es la media de la precipitación reconstruida.

Figure 3. Reconstructed seasonal precipitation from March to September. The grey line refers to accumulated precipitation values from March to September for a specific year; the dark line is a flexible curve to highlight events at a decade scale; the crooked line refers to the number of used radios to find de indexes for a precise year and the flat line is the mean of reconstructed.

noroeste del estado de Guanajuato y es un buen indicador de la variabilidad hidroclimática histórica de los últimos 200 años.

La cronología de pino piñonero en el sitio Las Palomas del Cubo, Municipio San Felipe en las cercanías de la Sierra del Cubo, Guanajuato, mostró un comportamiento diferente a la cronología de piñonero del sitio Ibarra, no obstante su relativa cercanía a dicho sitio. Con fines comparativos, se integró una estación climática regional compuesta por las estaciones San Pedro de los Almoloya, Peñuelitas, Lobos, San Isidro, Ocampo y San Felipe. Se encontró una correlación significativa ( $r = 0.70$ ,  $p < 0.01$ ) entre la versión estándar de la

It was not possible to verify the independent climate data reconstruction, due to limited available records. The generated linear equation is the following:

$$Y_t = 234.74 + 183.68 X_t$$

Where:

$Y_t$  = Value of the reconstructed precipitation for the period between March and September in a specific year (mm)

$X_t$  = Total ring index for the year in which the reconstruction is performed.



cronología y la precipitación total anual del período 1979 - 2003. Con base en esta relación, se generó una ecuación lineal con fines de reconstrucción, la cual fue significativa (Cuadro 3).

By applying the model to the dendrochronological indexes, a reconstruction of annual precipitation for the last 158 years (1850 - 2007) was obtained (Figure 4).

Cuadro 3. Análisis de regresión entre los índices dendrocronológicos de pino piñonero en el sitio Palomas, Guanajuato y la precipitación acumulada anual del período 1979 - 2003.

Table 3. Regression analysis between the dendrochronological indexes of *Pinus cembroides* at the Las Palomas site, and the accumulated annual precipitation for the 1979 - 2003 period.

Periodo	R <sup>2</sup>	Coefficientes	Error estándar	Prueba de "t"	Probabilidad
1979-2003	0.48	234.7387 183.6762	44.32908 41.99327	5.295366 4.373944	0.000035 0.000294

No fue posible verificar la reconstrucción con datos climáticos independientes debido a lo limitado de los registros climáticos disponibles. La ecuación lineal generada fue la siguiente:

$$Y_i = 234.74 + 183.68 * X_i$$

Donde:

$Y_i$  = Valor de la precipitación reconstruida para el periodo marzo-septiembre de un año específico (mm).

$X_i$  = Índice de anillo total para el año en que se realiza la reconstrucción.

Al aplicar el modelo a los índices dendrocronológicos se generó una reconstrucción de precipitación anual para los últimos 158 años (1850 - 2007) (Figura 4).

Al comparar las curvas flexibles decenales de ambas reconstrucciones, se observa que no obstante la baja asociación entre las reconstrucciones de precipitación con las cronologías de piñonero de los sitios Ibarra y Palomas, se detecta un comportamiento similar para ciertos periodos, en particular, después de 1900 (Figura 5).

Los períodos de comportamiento común corresponden a sequías generalizadas presentes en Guanajuato y otras regiones de país. Tal es el caso de las sequías ocurridas en las décadas de 1890 - 1900, 1920, 1950, 1970 y 1990, asociadas a patrones circulatorios que impactaron amplias regiones del país (Villanueva *et al.*, 2009).

Esta diferencia entre cronologías puede ser ocasionada debido a que si bien ambos sitios corresponden a la Región Hidrológica Lerma-Santiago y presentan un clima semiárido templado con lluvias en verano (BS<sub>1</sub>kw), el sitio IBA pertenece a la cuenca Río Verde Grande con una precipitación media anual de 400 a 600 mm y un régimen de humedad de suelo ústico (180 a 270 días de humedad), mientras que el sitio PAL

By comparing the flexible decadal curves of both reconstructions, despite the low association between the reconstructions of precipitation and the *Pinus cembroides* chronologies of both sites, a similar behavior for certain periods is detected, particularly after 1900. Figure 5 shows the 1850 - 2007 period common to both reconstructions.

Periods of common behavior are observed when drought is present in Guanajuato and other regions of the country, as it occurred in the 1890 - 1900, 1920, 1950, 1970 and 1990 decades, which is associated with circulation patterns that affected large territories (Villanueva *et al.*, 2009).

This difference between chronologies may happen because, although both sites belong to the Lerma-Santiago hydrologic region and have a semiarid climate with summer rains (BS<sub>1</sub>kw), the IBA site is located in the Río Verde Grande basin and has an average annual precipitation of 400 to 600 mm and a ustic soil moisture regime (180 to 270 days of humidity), while the PAL site is located within the Laja River basin, whose average annual precipitation varies between 125 and 400 mm with a xeric soil moisture regime (90 to 80 wet days) (Vidal-Zepeda, 1990; Maples-Vermeersch, 1992, CNA, 1998, García-CONABIO, 1998).

### Analysis of droughts and wet periods in Guanajuato

Reconstructed droughts for IBA were registered in 1796 - 1797, 1803 - 1805, 1807 - 1808, 1812 - 1817, 1835, 1837, 1919, 1928, 1953, 1959, 1982, 1989, 1999 and 2006 while in PAL corresponded to 1850, 1856, 1860, 1868, from 1899 to 1901, 1917, 1945, 1952, 1956, from 1959 to 1961, 1969, from 1973 to 1974, from 1998 to 1999 and 2006; these periods include some of the most important events that have affected Guanajuato and other areas of the Mexico, which are supported, too, by chronologies that have been made for the center and north of the country.

The synchrony between low-frequency events (wet and dry periods) is not similar between the various reconstructions of

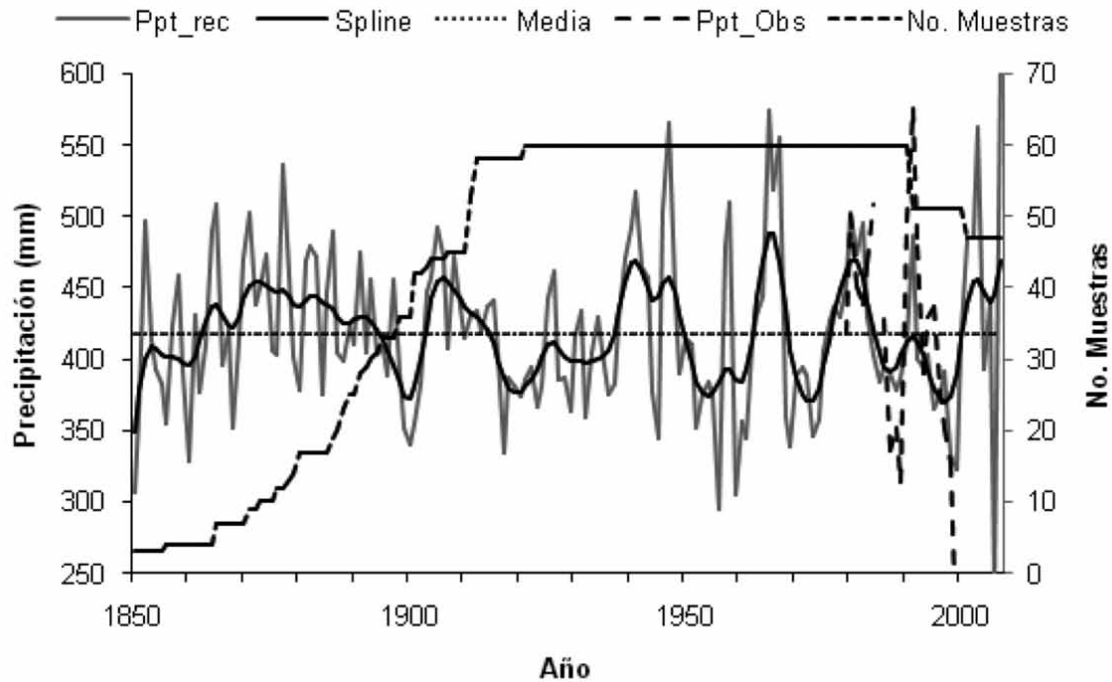


Figura 4. Precipitación estacional reconstruida anual. La línea gris representa los valores acumulados de precipitación anual para un año específico.  
 Figure 4. Annual reconstructed seasonal precipitation. The gray line represents the cumulative values of annual precipitation for a specific year.

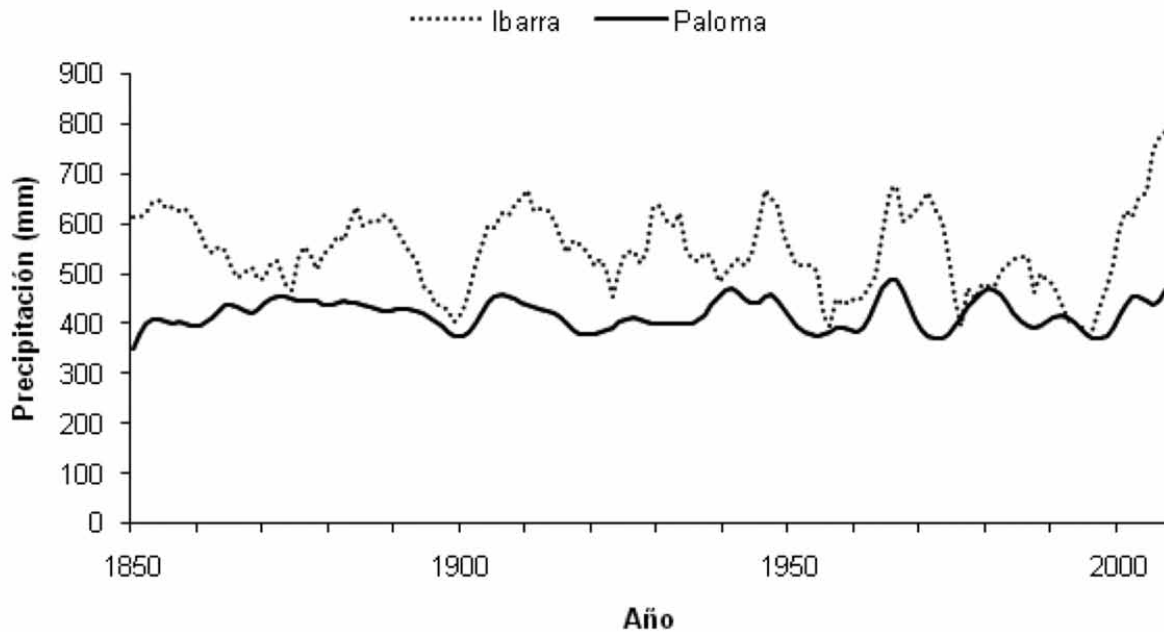


Figura 5. Curvas flexibles decenales que resaltan eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones de precipitación con cronologías de piñonero (Ibarra, Palomas) y precipitación estacional del centro-sur de la entidad. Se consideró el período 1850 - 2007 común para ambas reconstrucciones.  
 Figure 5. Flexible decadal curves that highlight low frequency events for precipitation reconstructions with *Pinus cembroides* chronologies and seasonal precipitation in south-central Guanajuato. 1850 to 2007 was considered a common period for both reconstructions.

se encuentra dentro de la cuenca Río Laja con precipitación media de entre 125 y 400 mm anuales y régimen de humedad de suelo xérico (90 a 80 días de humedad) (Vidal-Zepeda, 1990; Maples-Vermeersch, 1992; CNA, 1998; García-CONABIO, 1998).

## Análisis de las sequías y períodos húmedos en Guanajuato

Las sequías reconstruidas para IBA se registraron para 1796 - 1797, 1803 - 1805, 1807 - 1808, 1812 - 1817, 1835, 1837, 1919, 1928, 1953, 1959, 1982, 1989, 1999 y 2006, mientras que en PAL son 1850, 1856, 1860, 1868, 1899-1901, 1917, 1945, 1952, 1956, 1959 - 1961, 1969, 1973 - 1974, 1998 - 1999 y 2006 estos períodos abarcan algunos de los eventos más importantes que han afectado al estado de Guanajuato y a otras regiones de la República Mexicana, además de estar respaldados por cronologías realizadas para el centro y norte de México.

La sincronía entre eventos de baja frecuencia (períodos húmedos y secos) no ha sido similar entre las diversas reconstrucciones de precipitación invierno-primavera, particularmente si comparamos la precipitación reconstruida para el noroeste de Guanajuato contra otras desarrolladas para el norte y noreste de México. Esta situación pudiera atribuirse al impacto diferente del Niño para dichas regiones, al ser el efecto de mayor intensidad, en particular la fase cálida del Niño para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999; Seager *et al.*, 2009). No obstante lo anterior, es importante señalar que ciertos períodos húmedos fueron comunes para las reconstrucciones, lo cual significa que eventos El Niño de alta intensidad pudieron haber impactado gran parte del territorio nacional, incluyendo el estado de Guanajuato.

Entre el período de 1788 a 1811, en el estado de Guanajuato ocurrieron seis subperíodos secos en los años de 1780, 178 - 1786, 1793, 1803 y 1809 (Endfield *et al.*, 2004), aunque eventos aislados de sequía se reportan para los años de 1877, 1880, 1894, 1895, 1896, 1902 y 1905 (Contreras, 2005). A escala nacional solo se presentaron dos sequías que abarcaron de 1808 a 1809 y de 1810 a 1811, que provocaron pérdidas de cosecha y que trajeron aparejadas repercusiones económicas (Florescano, 1980; García, 1993), así como hambrunas, carestías e incremento en los precios de los alimentos básicos (Contreras, 2005). La falta de alimento aunado a la escasa disponibilidad de agua aun para aseo personal se asocia a la presencia de una epidemia de tifus que afectó el Valle de México entre 1785 y 1786 (Acuña-Soto *et al.*, 2002).

Sequías históricas detectadas en Guanajuato se han presentado simultáneamente hasta en regiones consideradas húmedas como es el caso de la Península de Yucatán, donde en

winter-spring precipitation, particularly if the reconstructed precipitation for northwest of Guanajuato is compared with those developed for north and northeastern Mexico, a situation attributable to the differences on the impact of El Niño in these regions, so the effect is more intense, especially in the warm phase of El Niño for the north (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999; Seager *et al.*, 2009). Nevertheless, it is worth noticing that some wet periods were common to the reconstructions, which means that events of high intensity of El Niño could impact large areas of the country, including the state of Guanajuato.

At the interval between 1788 and 1811, there were six drought sub-periods during the years of 1780, 1784 to 1786, 1793, 1803 and 1809 in this entity (Endfield *et al.*, 2004), and isolated records of drought for 1877, 1880, 1894, 1895, 1896, 1902 and 1905 (Contreras, 2005). On a national scale, there were only two that spanned from 1808 to 1809 and from 1810 to 1811, which resulted in crop losses and consequently, generated severe economic problems as shortages and increased prices of staple foods and even famine occurred (Florescano, 1980; García, 1993; Contreras, 2005). The lack of food combined with the scarcity of water, even for personal hygiene, is associated with a typhus epidemic that hit the Valley of Mexico between 1785 and 1786 (Acuña-Soto *et al.*, 2002).

Historical droughts detected in Guanajuato have occurred simultaneously in regions considered humid like the Yucatan Peninsula, where over the period between 1822 - 1823 and 1833 - 1834 led to migration, famine and turmoil. At the same time, this lack of water caused a rise in prices in Michoacan State (Contreras, 2005).

In the 1862 - 1905 period, a massive death of livestock was recorded in Sinaloa State. The drought of the 1870's led to a rise of prices in the same region (Escobar, 1997). In the case of north-central Mexico, the droughts of 1882 - 1883, 1889 - 1890 and 1891 - 1895 originated migration and dramatically affected livestock (Escobar, 1997; Contreras, 2005).

The conditions of the reconstructed precipitation above the regional average in IBA were observed in 1785 - 1788, 1822, 1849, 1879, 1905, 1907, 1917, 1949 - 1950, 1960 - 1961, 1968 - 1970, 1981, 2002 - 2004 and 2007, while for PAL in 1582, 1864 - 1865, 1871, 1877, 1882, 1905, 1940 1941, 1946 - 1947, 1957, 1958, 1965 - 1967, 1980, 1982, 1991, 2001 - 2003 and 2007.

Before 1950, three of the most humid periods were reconstructed, 1789 - 1797, 1840 - 1860 and 1905 - 1927. After the last year, three new events with precipitation above the regional average were available to study, but those before 1950, the wettest year barely reached precipitation conditions above average.

los períodos 1822 - 1823 y 1833 - 1834 ocasionaron migración, hambre y tumulto. Esta última sequía también originó alza de precios en Michoacán (Contreras, 2005).

En el período 1862 - 1905 se reporta muerte masiva de ganado en Sinaloa como en la década de 1860. La sequía de la década de 1870 originó carestía de grano para la misma región (Escobar, 1997). Para el centro-norte de México, las sequías de 1882 - 1883, 1889 - 1890 y 1891 - 1895 provocaron migración y afectaron drásticamente la ganadería (Escobar, 1997; Contreras, 2005).

Las condiciones de precipitación reconstruida por arriba del promedio regional en IBA se presentaron en los periodos de 1785 - 1788, 1822, 1849, 1879, 1905, 1907, 1917, 1949 - 1950, 1960 - 1961, 1968 - 1970, 1981, 2002 - 2004 y 2007, mientras que para PAL le corresponde a los años 1582, 1864 - 1865, 1871, 1877, 1882, 1905, 1940 1941, 1946 - 1947, 1957 1958, 1965 - 1967, 1980, 1982, 1991, 2001 - 2003 y 2007.

Antes de 1950 se reconstruyeron tres de los periodos más húmedos, entre los que destacan 1789 - 1797, 1840 - 1860 y 1905 - 1927. Posterior a 1950 se reconstruyeron tres nuevos eventos con precipitación por arriba de la media regional, aunque a diferencia de los anteriores a 1950, el año más húmedo apenas alcanzó condiciones de precipitación por arriba de la media.

En el estado de Guanajuato se tienen registros documentados de inundaciones desde el siglo XVII hasta nuestros días. En el período de 1770 a 2003 se han registrado 55 inundaciones severas en 19 municipios del estado, entre las que destacan las ocurridas en los años 1770, 1772, 1780, 1788, 1803, 1883, 1887, 1888, 1890, 1967, 1971, 1973, 1998 y 2003. Las consecuencias de estas inundaciones, provocadas por lluvias extraordinarias, fue el desbordamiento de ríos que ocasionó la muerte y desaparición de personas, pérdida de casas, inundación de caminos y terrenos situados aguas abajo, sin embargo, no todas fueron provocadas por las intensas lluvias, sino por causas antropogénicas como establecimiento de viviendas en sitios más susceptibles a daños, deforestación intensiva, sobrepastoreo y en consecuencia incremento en la erosión hídrica, etc. (Endfield *et al.* 2004; Escobar, 2004; Contreras, 2005; CONAGUA, 2007).

Aunque no todas las inundaciones se reflejan en un crecimiento superior en los árboles, las reconstrucciones analizadas, particularmente la derivada de la cronología de Ibarra, Ocampo, Guanajuato concuerda en alto grado con documentos históricos (Florescano, 1980; García, 1993; Escobar, 1997; Acuña-Soto *et al.*, 2002 y Contreras, 2005). Lo cual constituye una verificación, que hace que los datos reconstruidos tengan mayor validez científica.

Guanajuato has documented records of floods from the seventeenth century to the present. 55 severe ones have been recorded from 1770 to 2003, caused by extraordinary rains in 19 municipalities in the state, important ones occurred in 1770, 1772, 1780, 1788, 1803, 1883, 1887, 1888, 1890, 1967, 1971, 1973, 1998 and 2003. Their consequences included the flooding of rivers that caused the death and disappearance of people, loss of homes and flooding of roads and land located downstream; however, not all were caused by heavy rains, but by human factors such as the establishment of housing sites that are susceptible to damage, intensive deforestation, overgrazing, and therefore increased water erosion (Endfield *et al.*, 2004; Escobar 1997; Contreras, 2005; CNA, 2007).

Although not all floods are reflected in an upper ring width, even those that occur during the growing season of a species, since once the storage capacity of the soil is saturated, all the additional water runs off the surface and is not detected by the trees. In this study, the reproduction of the *Pinus cembroides* chronology, particularly Ibarra, exhibited higher annual growth rings in wet periods when flooding occurred as recorded in historical documents (Florescano, 1980; García, 1993; Escobar, 1997; Acuña-Soto *et al.*, 2002 and Contreras, 2005). This confirms that the dendrochronological reconstruction is well done and reliable for analyzing the hydroclimatic variation in the considered period.

Moreover, some reconstructed events of the northwest of Guanajuato were also recorded in the central-southern region of the state; such is the case of drought in the time intervals of 1798 - 1811, 1817 - 1839, 1944 - 1961 and 1999 - 2002, as well as periods with precipitation above the average as the 1789 - 1797, 1839 - 1860, 1906 - 1927, 1963 - 1970, 1987 1995 and 2003 - 2007 (Cortés *et al.*, 2010).

## Impact of El Niño-Southern Oscillation

El Niño Southern Oscillation (ENSO) is an atmospheric circulation pattern of major importance worldwide, which determines, to a large extent, the hydroclimate variability in northern and central Mexico (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999; Seager *et al.*, 2009). To analyze the degree of influence on the climatic conditions of the state of Guanajuato, a correlation analysis was performed between ring width index (IAA) and the reconstructed precipitation (Prec), ENSO indexes and the Tropical Precipitation Index (TRI, for its acronym in English), which is an estimate of this phenomenon (Wright, 1979) (Table 4).

A wavelet analysis was also developed, in which the dendrochronological time series were compared with the ENSO indexes and particularly with TRI. In this analysis, the red spots bounded by a black line indicate a significant relationship ( $p < 0.05$ ) between both variables (Figure 6). Horizontal arrows pointing to the right imply that both phenomena are in phase (their relation is positive) and when pointing to the left, they

Por otra parte, algunos periodos reconstruidos para el noroeste de Guanajuato también se registraron en la región centro-sur del estado, tal es el caso de sequías en los periodos de 1798 - 1811, 1817 - 1839, 1944 - 1961 y 1999 - 2002, así como periodos con precipitaciones por arriba de la media como los de 1789 - 1797, 1839 - 1860, 1906 - 1927, 1963 - 1970, 1987 - 1995 y 2003 - 2007 (Cortés et al., 2010).

### Impacto del Niño-Oscilación del Sur

El fenómeno del Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es uno de los patrones atmosféricos circulatorios de mayor importancia a nivel mundial y que determina en gran medida la variabilidad hidroclimática en el norte y centro de México (Stahle et al., 1998; Magaña et al., 1999; Seager et al., 2009). Para analizar el grado de influencia de este fenómeno en las condiciones climáticas del estado de Guanajuato, se realizó un análisis de correlación entre el índice de ancho de anillo (IAA) y la precipitación reconstruida (Prec) e índices ENSO e Índice de Lluvia Tropical (TRI, por sus siglas en inglés), el cual constituye un estimativo de dicho fenómeno (Wright, 1979) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Análisis de correlación entre la precipitación reconstruida y el índice de ancho de anillo (IAA) de las cronologías de pino piñonero contra los índices de ENSO y TRI, período 1950 - 1995 en las localidades de Ibarra y Las Palomas.

Table 4. Correlation analysis between reconstructed precipitation and ring width index (DAI) of the *Pinus cembroides* chronologies against ENSO and TRI indexes over the 1950 - 1995 period at Ibarra and Las Palomas locations.

Variables comparadas	Periodos					
	Sitio					
	Anual		Ene-Jun		Jul-Dic	
	IBA	PAL	IBA	PAL	IBA	PAL
Prec vs. Índices ENSO	-0.1208	0.3052	-0.0344	0.1829	-0.1534	0.3175
IAA vs. Índices ENSO	-0.1208	0.3052	-0.0344	0.1829	-0.1534	0.3175
Prec. vs. TRI	-0.2080	0.3000	-0.0625	0.2184	-0.2480	0.2648
IAA vs. TRI	-0.2080	0.3000	-0.0625	0.2184	-0.2480	0.2648

IBA = Ibarra; PAL = Palomas del Cubo; IAA = index of ring width.

También se desarrolló un Análisis de Ondeleta, en el que se compararon las series de tiempo dendrocronológicas con los índices ENSO y particularmente con el TRI. En este análisis, las manchas rojas delimitadas por una línea negra indican una relación significativa ( $p < 0.05$ ) entre ambas variables (Figura 6). Las flechas horizontales hacia la derecha, indican que ambos fenómenos están en fase (que su relación es positiva) y cuando las flechas apuntan hacia la izquierda, sugieren relación negativa. Las flechas que se presentan en forma vertical, indican que los fenómenos están desfasados.

La serie dendrocronológica del sitio Ibarra ubicado en el municipio de Ocampo, Guanajuato, muestra una influencia significativa de índices ENSO del período invernal (enero-marzo)

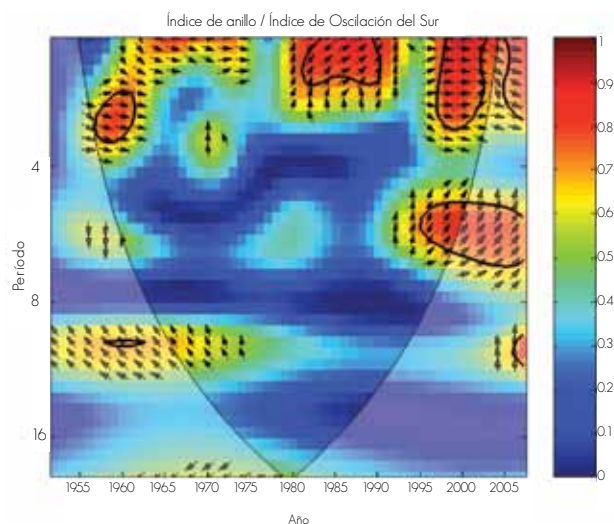


Figura 6. Análisis de Ondeleta que muestra la relación entre el Índice de Oscilación del Sur, periodo estacional enero-marzo e índices de anillo total de *Pinus cembroides* del sitio Ibarra.

Figure 6. Wavelet analysis showing the relationship between the Southern Oscillation Index, January-March seasonal period and total ring indexes of *Pinus cembroides* on the Ibarra site.

suggest a negative relation. The vertical arrows mean that the phenomena are out of phase.

The dendrochronological series of the Ibarra site show a significant influence of ENSO indexes from the winter period (January-March) at frequencies of one to two years for 1957 and 1962, two to three years for 1981 - 1990 and one year for 1997 - 2003.

For the rest of the years that were studied, no relationship was determined, a situation that reveals the inconsistency that characterizes this phenomenon in the region. The same analysis was performed for the Las Palomas site, which indicated that the chronology was influenced significantly during the period

en frecuencias de 1 a 2 años para los años de 1957 a 1962, dos a tres años para el período 1981 - 1990 y un año para el período 1997 - 2003.

Para el resto de los años estudiados, no se encontró ninguna relación, situación que es indicativa de la inconsistencia que caracteriza a este fenómeno en la región. El mismo análisis se realizó para el sitio La Paloma, e indicó, que la cronología estuvo influenciada significativamente durante el período estacional octubre-enero por índices ENSO (TRI), en frecuencias de 5 a 7 años, pero sólo para el período de 1947 a 1958 (Figura 7).

Al comparar los índices dendrocronológicos de pino piñonero contra los valores de ENSO en su fase fría y cálida, el análisis no mostró una influencia definida de este fenómeno en los valores de las cronologías (Cuadro 5).

Información similar, se puede derivar de la superficie siniestrada de temporal en Guanajuato y la influencia de las fases de ENSO (Niño o Niña) para el período 1980 - 2005. De esta manera, en ciertos años Niños como los de 1982, 1987, 1992 y 2005, la superficie siniestrada de cultivos

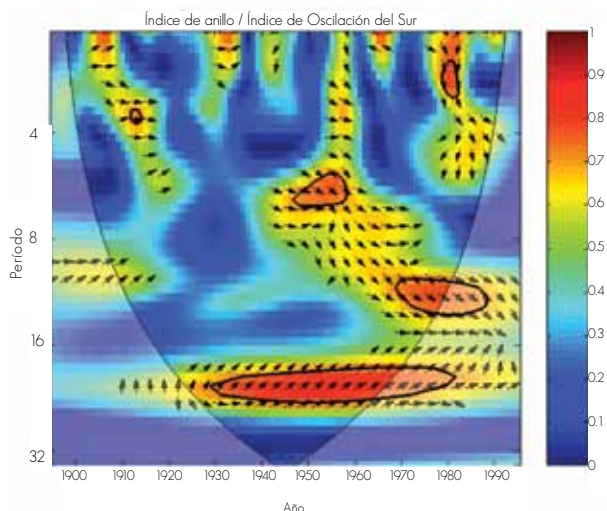


Figura 7. Análisis de Ondeleta que muestra la relación entre el Índice de Oscilación del Sur, período estacional octubre-enero e índices de ancho de anillo total de *Pinus cembroides* del sitio Las Palomas.

Figure 7. Wavelet analysis showing the relationship between the Southern Oscillation Index, seasonal period of October to January and indexes of total ring width of *Pinus cembroides* from the Las Palomas site.

Cuadro 5. Relación entre los índices de crecimiento (IAA) de las cronologías de *Pinus cembroides* para los sitios Ibarra y Palomas y el efecto de la fase fría y cálida de ENSO.

Table 5. Relationship between growth indexes (IAA) of the *Pinus cembroides* chronologies for Ibarra and Las Palomas sites and the effect of cold and warm phase of ENSO.

Año (Fase Fría)	IBA	PAL	Año (Fase Cálida)	IBA	PAL
	IAA			IAA	
1906	1.376	1.294	1905	1.790	1.399
1908	1.223	1.292	1911	0.727	1.070
1909	0.947	1.098	1913	0.856	1.004
1910	1.317	0.983	1918	0.849	0.831
1916	1.469	0.928	1940	0.831	1.406
1922	0.856	0.869	1963	0.503	1.065
1924	0.642	0.801	1965	0.721	1.848
1938	0.525	1.064	2002	1.717	1.366
1954	0.532	0.814	2006	1.655	2.073
1956	0.992	0.327			
1964	0.460	1.136			
1967	1.270	1.742			
1974	0.762	0.668			
1975	1.120	0.935			
2007	1.655	2.073			

IBA = Ibarra; PAL = Palomas del Cubo

Información similar, se puede derivar de la superficie siniestrada de temporal en Guanajuato y la influencia de las fases de ENSO (Niño o Niña) para el período 1980 - 2005. De esta manera, en ciertos años Niños como los de 1982, 1987, 1992 y 2005, la superficie siniestrada de cultivos de temporal alcanzó hasta cerca del 50%, pero durante años Niña, particularmente 1989, 1996, 1999 y 2000, la superficie siniestrada fue igual o superior a la ocurrida en años Niño, e incluso algunos años catalogados como normales como los de 1980, 1981 y 1982 también mostraron alto porcentaje de siniestro (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato, 2006).

Con esta información, se puede argumentar la falta de claridad del impacto del fenómeno ENSO en esta región de Guanajuato, cuyo crecimiento de los árboles de *P. cembroides* está influenciado por este fenómeno, siempre y cuando la señal sea muy intensa, situación en la que afecta amplias zonas del país. Otros fenómenos atmosféricos como tormentas tropicales o ciclones e incluso el Monzón Mexicano (MM), pudieran tener un mayor impacto en el clima de esta región (Therrell *et al.*, 2002).

## CONCLUSIONES

El conocimiento histórico de la variabilidad del clima constituye un elemento esencial para entender el clima actual y estar en posibilidades de modelar el clima venidero. Con esta premisa, en el presente estudio, se generaron series de tiempo dendrocronológicas con una extensión superior a 200 años.

Dos cronologías de *P. cembroides* se desarrollaron en este estudio para el noroeste del estado. No obstante su cercanía geográfica, no mostraron correlación significativa para el período total de comparación; por lo que se utilizaron de manera independiente para reconstrucciones de precipitación. Con la cronología de IBA se produjo una reconstrucción de precipitación estacional marzo-septiembre con una extensión de 208 años (1790 - 2007), mientras que la reconstrucción para el sitio PAL fue anual (enero-diciembre), con una extensión de 158 años (1850 - ). Las reconstrucciones, coincidieron en gran medida, con eventos históricos documentados relacionados con sequías e inundaciones para el estado de Guanajuato y otros estados de la república mexicana.

Un análisis minucioso del efecto histórico del Niño, en la disponibilidad de lluvia y producción de cultivos de temporal, mostró alta inconsistencia en su impacto, y sólo aquellos eventos de alta intensidad de ENSO tuvieron influencia en la precipitación, superficie siniestrada e índices de crecimiento de las especies utilizadas. Este comportamiento es un indicativo, de que para tener un conocimiento más sólido de la influencia de este fenómeno en la región de estudio es necesario analizar el comportamiento de variaciones en temperatura, presión atmosférica, dirección e intensidad de los vientos, humedad

from October to January by ENSO indexes (TRI), at frequencies of 5 to 7 years, but only from 1947 to 1958 (Figure 7).

After comparing the dendrochronological indexes of *Pinus cembroides* against the values of ENSO in its warm and cold phase, the analysis did not show a defined influence of this phenomenon over the values of the chronologies (Table 5).

Similar information can be derived from seasonal affected areas of Guanajuato and the influence of the phases of ENSO (Niño or Niña) for the 1980 - 2005 period. Thus, in some "Niño" or "Niña" years as were 1982, 1987, 1992 and 2005, the affected area of rainfed- crops amounted to almost 50%, but for the "Niña" years, 1989, 1996, 1999 and 2000, in particular, this deficiency was equal or above those that occurred on "Niño" years, and even a few years classified as "normal" like 1980, 1981 and 1982 also showed high damage per cent (SDAEG, 2006).

Based on the former statements, it can be argued that the lack of clarity of the ENSO effect on this region of Guanajuato, where *Pinus cembroides* growth is influenced by it, as long as the signal is very intense, a situation that affects large parts of the country. Tropical storms, cyclones or the Mexican Monsoon (MM) may have a greater impact over the climate of the region (Therrell *et al.*, 2002).

## CONCLUSIONS

The historic knowledge about the variability of climate is an essential element to understand the present one and to be able to model the forthcoming climate. From this standing point, dendrochronology time series had an extent beyond 200 years.

The two chronologies of *Pinus cembroides* that were developed in the northwest region of Guanajuato state showed no significant correlation for the total period of comparison, therefore they were used independently for precipitation reconstructions. With the IBA chronology, a reconstruction of seasonal precipitation from March to September was produced with an extension of 208 years (1790 - 2007), while for the PAL site it was annual (January to December), with an extension of 158 years (1850 to 2007). Both agreed largely with historical events related to droughts and floods in Guanajuato and other states of Mexico.

The careful analysis of the historical effect of El Niño, on the availability of rain and seasonal crop production showed high inconsistency in its impact, and only those ENSO high-intensity events had an influence on precipitation, affected areas and growth indexes of used species.

The generated information provides knowledge related to historical climate variability over more than 200 years in the state of Guanajuato, as well as the influence of atmospheric circulation patterns, particularly ENSO. This knowledge, although still incipient, is the beginning of a future network of

relativa y otras variables meteorológicas, que aunado a información climatológica actualizada, procedente del monitoreo del Pacífico Tropical, pueda soportar un entendimiento más completo de la influencia de ENSO en Guanajuato y su potencial de predicción.

La información generada aporta conocimiento relacionado con la variabilidad histórica del clima superior a 200 años en el estado de Guanajuato, así como de la influencia de patrones atmosféricos circulatorios, particularmente ENSO. Este conocimiento, aunque todavía incipiente, constituye el inicio para el desarrollo de una red de cronologías más completa de anillos de árboles en el estado de Guanajuato y que en un futuro alimente modelos de predicción, que permitan anticipar episodios climáticos extremos debido al calentamiento global, así como su relación con el manejo sustentable y conservación de los recursos naturales.

## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado con fondos CONAFOR-CONACYT de la convocatoria 2006-1, dentro del proyecto "Manejo integral de los recursos naturales en el ámbito de la ciudad de León, Guanajuato", clave: 33366. También se recibió apoyo del 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, a su vez financiado por el US/Nacional Science Foundation (Grant GEO-0452325).

## REFERENCIAS

Acuña-Soto, R., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland and M. D. Therrell. 2002. Megadrought and megadeath in 16<sup>th</sup> century Mexico. *Emerging Infectious Diseases* 8 (4):360-362.

Comisión Nacional del Agua (CNA) 1998. Cuencas Hidrológicas. Escala 1:250000. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (30 de noviembre de 2010).

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2007. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. México. 259 p.

Constante G., V., J. Villanueva D., J. Cerano P., E. H. Cornejo O. y S. Valencia M. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Rev. Cien. For. Mex.* 34 (106):17-39.

Contreras S., C. 2005. Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*. 56: 118-133.

Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47:37-59.

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., R. R. Seager, M. A. Cane and D. W. Stahle. 2007. North American drought: reconstruction, cause, and consequences. *Earth Science Review* 8:93-124.

Cortés B., E. N., J. Villanueva D., J. Estrada A., C. Nieto de Pascual P., V. Guerra De la C. y O. Vázquez C. 2010. Utilización de *Taxodium mucronatum* Ten. para determinar la variación estacional de la precipitación en Guanajuato. *Rev. Mex. Cien. For.* 1(1):105-112.

Delgado C., S. 2000. Aplicaciones estadísticas en análisis dendrocronológicos. In: Roig, F. A. (Comp.): *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC. Mendoza, Argentina. pp. 79-102.

more complete tree ring chronologies in the state and that can be used for predictive models that allow anticipating extreme weather events produced by global warming and its relationship to sustainable management and preservation of natural resources.

## ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded by CONAFOR-CONACYT through the "Integrated management of natural resources in the area of Leon, Guanajuato" project Number 33366. Also, support from the American Institute for Climate Change Research (IAC) was received, through the project CRN # 2047 Documentation,

Eguluz P., T. 1982. Clima y distribución del *Pinus* en México. *Ciencia Forestal* 7(38):30-44.

Endfield G., h., I. Fernández T. and S. L. O'Hara. 2004. Conflict and cooperation: water, floods and social response in colonial Guanajuato, Mexico. *Environmental History*. 9 (2): 14 - 43.

Escobar O., A. 1997. Las sequías y su impacto en las sociedades del México Decimonónico, 1856-1900. *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Historia y Desastres en América Latina II*: 2-32.

Florescano E., M. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D. F. México. 157 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. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press Inc. New York, NY, USA. 565 p.

García A., V. 1993. Las sequías históricas de México. *Desastres y Sociedad* 1(1):1-18.

García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Climas. Clasificación de Köppen, modificado por García. Escala 1:1000000. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (30 de noviembre de 2010).

Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating cross-dating 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, Geografía e Informática INEGI. 1998. Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Gobierno del Estado de Guanajuato. 151 p.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 1997. Estaciones climáticas extraído de ERIC (Extractor Rápido de información Climática). 1 CD. Instituto Mexicano de tecnología del Agua - Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales - IMTA. Jiutepec, Mor., México. CD. s/p.

Instituto Nacional de Ecología. 2003. Diagnóstico bio-físico y socio-económico de la cuenca Lerma-Chapala. Instituto Nacional de Ecología. Dirección de Investigación de ordenamiento ecológico y conservación de ecosistemas. Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas. México, D.F., México. 226 p.

Magaña, R., V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. In: Magaña Ruiz, V. (Ed.). *Los impactos de El Niño en México*. SEP - CONACYT. Mexico, D. F. México. pp. 23-68.

Maples-Vermeersch, M. 1992. Regímenes de humedad del suelo. In: Universidad Nacional Autónoma de México. Hidrografía IV.6.2 Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM, México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (30 de noviembre de 2010).

Martínez, M. 1948. *Los pinos mexicanos*. Edición botas, 2ª. Edición. México, D. F. México. 20 p.

Seager R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Nike, J. Nakumara, C. Lie, E. Cook and D. W. Stahl. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmosfera* 22(1):1-31.



- Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato (SDAEG). 2006. La agricultura de temporal en Guanajuato: análisis para mejorar la productividad. Guanajuato, Gto. México. 12 p.
- Stahle, D. W., E. R. Cook, J. Villanueva-Díaz, F. K. Fye, D. J. Burnett, R. D. Griffin, R. Acuña-Soto, R. Seager and R. R. Heim. 2009. Early 21st-century drought in Mexico. *Eos* 90 (17):89-90.
- 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. Guy, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva-Díaz and Thompson, L. G. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 70 (10): 2137-2152.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. The University of Chicago Press. Chicago, IL USA. 73 p.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland and, J. Villanueva-Díaz. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research* 107 (D14): 61-67.
- Tropical Atmosphere Ocean project (TAO). 2010. Pacific Marine Environmental Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration. <http://www.pmel.noaa.gov/tao/>. (11 de octubre de 2010).
- Vidal-Zepeda, R. 1990. Precipitación media anual. In: *Precipitación*, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (30 de noviembre de 2010).
- Villanueva D., 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. En Méx.* 34(105):37-69.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., J. Estrada A., V. Guerra De la C., D. W. Stahle, V. Constante G., P. Ruiz A., G. F. Cardoza M. y O. A. Palacios V. 2010. Análisis de la variabilidad hidroclimática en el estado de Tlaxcala, México. In: Estrada Ávalos, R. Trucios C., J. Villanueva D., M. Rivera G., L. F. Flores Lui (Eds.). *Manejo sustentable de los recursos naturales del Río Zahuapan*, Tlaxcala. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo. 206 p.
- Wright, P. B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the central Pacific. *Nature* 277: 371-374.