

# RECONSTRUCCIÓN DE LOS NIVELES DEL LAGO DE CHAPALA CON SERIES DENDROCRONOLÓGICAS DE *Taxodium mucronatum* Ten.

## RECONSTRUCTION OF THE LEVELS OF CHAPALA LAKE BY DENDROCHRONOLOGICAL SERIES OF *Taxodium mucronatum* Ten.

José Villanueva DÍaz<sup>1</sup>, Julián Cerano Paredes<sup>1</sup>, Juan de Dios Benavides<sup>2</sup>, David W. Stahle<sup>3</sup>,  
Juan Estrada Ávalos<sup>1</sup>, Vicenta Constante García<sup>1</sup> y Miriam Tostado Plascencia<sup>1</sup>

### RESUMEN

La cuenca hidrológica Lerma-Chapala-Santiago que drena hacia el Lago de Chapala ha sido intensamente impactada por las actividades humanas, lo cual ha alterado el ciclo hidrológico y afectado la recuperación anual del mismo. Para determinar la fluctuación histórica de sus volúmenes se desarrolló una red de nueve cronologías de poblaciones de *Taxodium mucronatum* distribuidas en bosques de galería de dicha cuenca. Las series de tiempo se analizaron mediante Componentes Principales y ello derivó en una cronología regional de 547 años (1462-2008). La asociación entre los índices dendrocronológicos y los datos del restablecimiento de los niveles del lago del año previo fue significativo, por lo que se creó un modelo de regresión para su reconstrucción. Los valores reconstruidos mostraron una alta variabilidad interanual y multianual que se asocia con sucesos extremos de El Niño-Oscilación del Sur. No obstante, el cambio de uso del suelo y el aprovechamiento indiscriminado del agua para diversos fines, en las últimas décadas, han enmascarado su efecto. Sequías de alta intensidad se detectaron en los períodos 1508-1560, 1581-1608, 1685-1725, 1770-1840, 1916-1924 y 1988-2000. De igual manera, algunas etapas húmedas notables ocurrieron en 1561-1578, 1610-1616, 1760-1769, 1842-1850, 1863-1893 y 1926-1963. De 1960 a la fecha, la recuperación anual del lago disminuyó a causa de la influencia humana. El entendimiento de las oscilaciones históricas en la profundidad del lago permitirá fundamentar acciones para un mejor uso del agua y la conservación de los ecosistemas rivereños que dependen de los recursos hídricos generados en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago para su supervivencia.

**Palabras clave:** Dendrocronología, ENSO, Lago de Chapala, nivel del lago, *Taxodium mucronatum* Ten., sequía.

### ABSTRACT

The Lerma-Chapala-Santiago basin draining toward the Chapala Lake has been strongly impacted by humans by altering the hydrological cycle and affecting the annual recovery of the lake. To determine historical behavior of the lake levels, a network of cypress (*Taxodium mucronatum*) chronologies was developed from trees thriving along the main tributaries of the lake. The tree-ring series were analyzed by Principal Component Analysis and a regional ring-width chronology with a length of 547 years (1462-2008) was developed with those series having a common climatic signal. A correlation analysis between the regional chronology and lake levels with a lag of one year was significantly associated and a regression model was developed for reconstruction purposes. The reconstructed levels showed high inter-annual and multiannual variability and were associated with intensive El Niño Southern Oscillation events, although in the last decades aggressive land-use changes may have masked the influence of this phenomena. Low levels of the lake were associated to intensive droughts reconstructed for the periods 1508-1560, 1581-1608, 1685-1725, 1770-1840, 1916-1924, and 1988-2000. On the other hand, wet episodes took place in the periods 1561-1578, 1610-1616, 1760-1769, 1842-1850, 1863-1893, and 1926-1963. From 1960 to date the annual variability of the lake has decreased due to increased human pressure on available water resources. The historical understanding of the historic fluctuations lake levels will promote actions toward a better use of water resources and for conservation of riparian ecosystems depending on the water yielded in the Lerma-Chapala-Santiago basin.

**Key words:** Dendrochronology, ENSO, Chapala lake, lake levels, *Taxodium mucronatum* Ten., drought.

Fecha de recepción: 22 de diciembre de 2010

Fecha de aceptación: 22 de octubre de 2012

<sup>1</sup> Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Suelo, Agua Atmósfera, INIFAP. Correo-e: villanueva.jose@inifap.gob.mx

<sup>2</sup> Campo Experimental Los Colomos. CIR -Pacífico Centro. INIFAP

<sup>3</sup> Instituto de Geografía, Departamento de Geociencias, Universidad de Arkansas.

## INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son cada vez más limitados en países que, como México, poseen un alto porcentaje de superficie semiárida y en donde varios asentamientos humanos explotan aguas fósiles. Esta situación puede agravarse debido al calentamiento global, por lo que gran parte de los modelos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático sugieren un incremento en la aridez (Seager *et al.*, 2009).

El Lago de Chapala (LC), catalogado como el tercero más grande en Latinoamérica por su magnitud, 1,116 km<sup>2</sup>, (CONAGUA, 2008), está inmerso en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, la cual es una de las regiones hidrológicas con graves problemas de agua, mismos que se derivan, en particular, de la alta concentración poblacional que habita en su área de recarga, cuyos desechos urbanos, industriales y agropecuarios terminan en su vaso de almacenamiento. Ello, aunado a la erosión y aporte de nutrientes al lago, favorece el desarrollo de especies acuáticas invasoras, que incrementan la pérdida del líquido por evapotranspiración.

A pesar de que las actividades humanas han alterado los volúmenes captados en el lago, esta fluctuación también es parte de la variabilidad hidroclimática natural, a su vez influenciada por patrones de circulación general (Stahle *et al.*, 2011). Registros históricos de los niveles del lago en el período 1900-2009 (CEA, 2010) indican que los valores máximos se presentaron en 1926 y los mínimos en 1955 y 2002.

El conocimiento de la variabilidad histórica, más allá de los registros instrumentales, puede aportar información relacionada con la fluctuación hidroclimática de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago y de su impacto sobre los niveles del lago. Es posible derivarlo de fuentes indirectas como los anillos de árboles, los cuales generan información de alta resolución (Wiles *et al.*, 2009). Así, los objetivos del presente estudio consistieron en utilizar series dendrocronológicas de *Taxodium mucronatum* Ten. (sabino o ahuehuete) presentes en afluentes que drenan hacia el LC, para determinar las fluctuaciones históricas en su nivel y analizar la influencia de patrones atmosféricos circulatorios y de cambios de uso del suelo en los volúmenes hídricos que alcanza el lago.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El Lago de Chapala se localiza en el occidente de México, entre los paralelos 20° 07' y 20° 21' latitud norte y los meridianos 102° 40' 45" y 103° 25' 30" longitud oeste, a una altitud de 1,524 m (CONAGUA, 2008). El LC posee una superficie de 1,112 km<sup>2</sup>, y una profundidad media de 4 a 6 m, con máximos de 9 m. El volumen más alto consignado ha sido de 8,148 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, aunque ha descendido hasta 1,576 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> en períodos muy críticos (CEA Jalisco, 2010).

## INTRODUCTION

Water resources are becoming more limited in countries like Mexico, which have a high per cent of semi-arid land and where several human settlements exploit fossil waters. This situation might get worse due to global warming, thus, a great number of the Intergovernmental Panel on Climate Change models suggest an increment in aridity (Seager *et al.*, 2009).

Chapala Lake (LC), that has been classified as the third greatest lake in Latin America from its great magnitude, 1,116 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2008), is within the Lerma-Chapala-Santiago basin, which is one of the hydrologic regions with severe water problems, which come from a high population concentration, in particular, that inhabits its water recharge area, where urban, industrial, agriculture and livestock activities drain their waste. This fact, in addition to erosion and nutrient deposition to the lake, favors the development to invasive aquatic species, which, at the same time, increase water loss by evapotranspiration.

In spite of the fact that human activities have affected the volumes received by the lake, this fluctuation always is part of the natural hydroclimatic variability, influenced itself, by the general circulation patterns (Stahle *et al.*, 2011). Historical records of the lake levels in the 1900-2009 period (CEA, 2010) indicate that the maximum volumes occurred in 1926, and the minimal in 1955 and 2002.

To know the historical variability, beyond the instrumental records, may report information that is related to the hydroclimatic fluctuation of the Lerma-Chapala-Santiago basin and to its impact upon the levels of the lake. It is possible to get this knowledge from "proxy" sources such as tree rings, which produce high resolution information (Wiles *et al.*, 2009). Therefore, the aims of the actual study were to use cypress or "ahuehuete" dendrochronological series (*Taxodium mucronatum* Ten.) from trees present at the tributaries that drain into LC to determine the historic fluctuations in its level and to analyze the influence of atmospheric circulatory patterns and of land-use change over the water levels that the lake gets up to.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

Chapala lake is located at western Mexico, between 20° 07' and 20° 21' North and 102° 40' 45" and 103° 25' 30" West, at 1,524 m high (CONAGUA, 2008). LC extends over 1,112 km<sup>2</sup>, and has an average depth of 4 to 6 m, with maximal values of 9 m. The highest level ever recorded has been of 8,148 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, even though it has gone down up to 1,576 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> in very critical periods (CEA Jalisco, 2010).

Este lago es parte de una cuenca mayor conocida como Lerma-Chapala-Santiago, donde habita 15.6% de la población mexicana, y se distribuye en los estados de Guanajuato, Estado de México, Jalisco, Michoacán y Querétaro. El clima se clasifica como semi-seco, con una temperatura media anual de 19.9 °C, temperatura máxima de 27 a 30 °C y mínima de 9 a 12 °C. El régimen de lluvias es de verano con una precipitación total anual de 875 mm (INE, 2003).

En los últimos 50 años, la cuenca Lerma-Chapala-Santiago se ha transformado a consecuencia de las políticas de desarrollo nacional, que fomentaron la formación de distritos de riego mediante la construcción de 552 presas y la creación de un eje industrial, el cual vincula a las poblaciones a lo largo del río Lerma.

### Niveles del lago

Para definir las variaciones interanuales durante 1910 en los volúmenes del LC se determinó una cota altitudinal arbitraria de 10000 a 1,526.8 m; sin embargo, en 1981 la Secretaría de Recursos Hidráulicos estableció una nueva cota de 97.80 msnm (1,526 msnm), que corresponde a una profundidad media de 8 m y a un almacenamiento máximo de  $7,897 \times 10^6 \text{ m}^3$ . De 1900 a la fecha, el almacenamiento máximo registrado fue de  $9,663 \times 10^6 \text{ m}^3$  (cota 99.33 msnm) en septiembre de 1926, y el mínimo, en junio de 1955, con  $954 \times 10^6 \text{ m}^3$  (cota 90.80 msnm) (CEA Jalisco, 2010).

### Muestreo dendrocronológico

Con base en una exploración de las áreas ribereñas en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago se ubicaron nueve sitios con presencia de ahuehuate (Figura 1).

A partir de árboles seleccionados con aspecto longevo se obtuvieron incrementos con un taladro de 666-Pressler de 35 a 75 cm de longitud y 5.1 mm de diámetro interno. Las muestras se procesaron mediante métodos dendrocronológicos estándar (Stokes y Smiley, 1968), y cada crecimiento individual se midió con un sistema de medición VELMEX (Robinson y Evans, 1980). El cofechado, la calidad de la respuesta climática y la exactitud de la medición de cada anillo se verificaron con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con el clima se removieron con el programa ARSTAN (Cook, 1987).

Para desarrollar una serie dendrocronológica representativa de la variabilidad hidroclimática regional de la cuenca, se corrió un análisis de Componentes Principales. Los valores anuales de cota máxima y mínima, de volumen máximo y mínimo y de la diferencia entre los volúmenes máximo y mínimo registrados de 1900 a 2009 (Figura 2) se compararon contra la serie regional de los índices de anillo total de crecimiento.

This lake is part of a larger basin known as Lerma-Chapala-Santiago –where 15.6% of the Mexican population live– and it is distributed in the states of Guanajuato, México, Jalisco, Michoacán and Querétaro. The weather is classified as semi-dry, with an average annual temperature of 19.9 °C, and a maximal temperature of 27 a 30 °C and a minimal of 9 to 12 °C. Rain regime takes place in summer with a total annual precipitation of 875 mm (INE, 2003).

In the last 50 years, the Lerma-Chapala-Santiago basin has been transformed as a consequence of national development policies that fostered the formation of irrigation districts through 552 dams and the creation of an industrial corridor, which links populations along the Lerma river.

### Lake levels

In order to determine the inter-annual variations of the LC volumes, in 1910 an arbitrary limit was established from 100.00 to 1,526.8 m asl; however, in 1981 The Ministry of Water Resources declared another level at 97.80 (1,526 m), with an average depth of 8 m and a maximal storage capacity of  $7,897 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Since 1900 up to day, the maximal recorded storage capacity was  $9,663 \times 10^6 \text{ m}^3$  (99.33 level) in September 1926, and the minimal in June of 1955, with  $954 \times 10^6 \text{ m}^3$  (90.80 level) (CEA Jalisco, 2010).

### Dendrochronological sampling

Based on an exploration of the river areas in the Lerma-Chapala-Santiago basin nine sites with cypress were located (Figure 1).

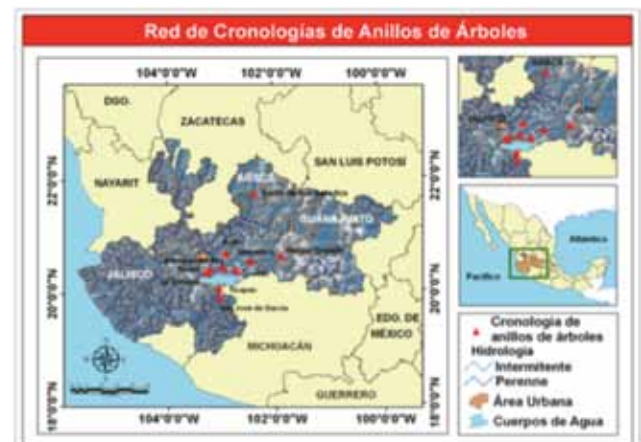
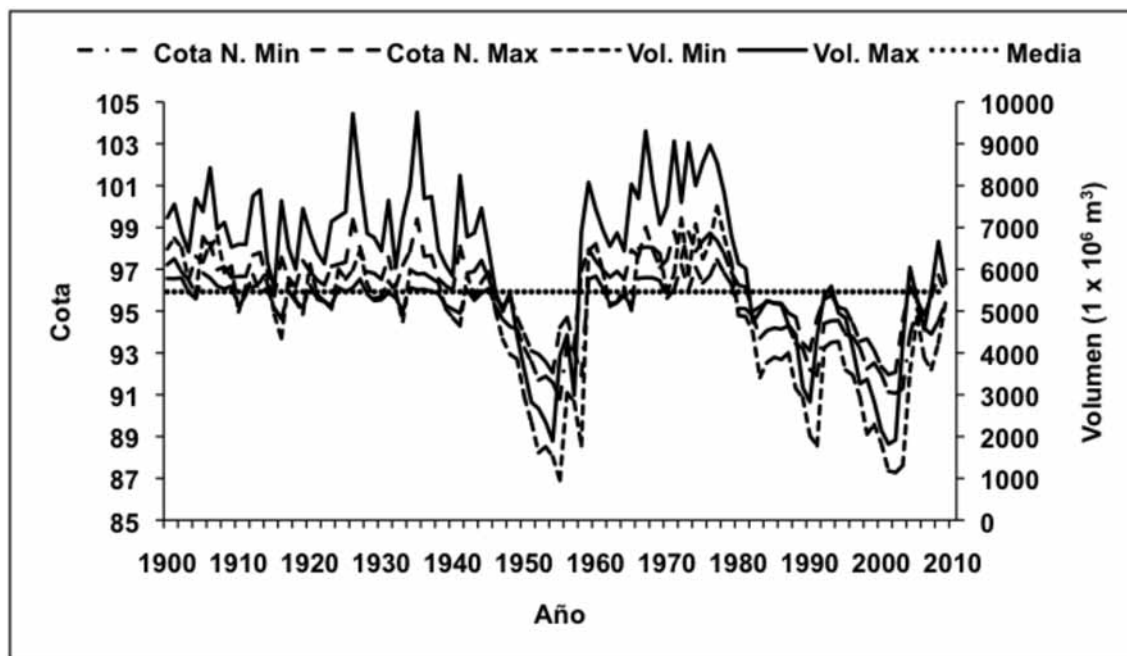


Figura 1. Distribución de sitios de muestreo de ahuehuate en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago.

Figure 1. Sampling cypress sites in the Lerma-Chapala-Santiago basin.



Fuente: Comisión Estatal del Agua en Jalisco (2010).

Source: Comisión Estatal del Agua en Jalisco (2010).

Figura 2. Registro de cotas máximas, mínimas y niveles del Lago de Chapala alcanzados en el período 1900-2009.

Figure 2. Maximal and minimal records and levels of Chapala Lake during the 1900-2009 period.

La asociación entre los registros indicados y la serie de crecimiento se cuantificó para varios subperíodos. Esta relación se determinó de manera directa, sin transformación de las variables, pero con las necesarias para normalizarlas, como aquellas de tipo logarítmico, raíz cuadrada,  $x^2$ , inversa ( $1/x$ ), entre otras (Brito *et al.*, 2003). El período de comparación que resultó estadísticamente significativo se dividió en dos subperíodos para las pruebas de calibración y verificación del modelo de reconstrucción (Fritts, 1976).

La reconstrucción se desarrolló para la longitud total de la cronología; no obstante, se enfatizó el lapso en el cual el tamaño de muestra garantizara que la señal climática reconstruida tuviera confiabilidad estadística. Al período reconstruido se le aplicó una curva decenal flexible, a fin de resaltar sucesos de baja frecuencia como los períodos secos y húmedos, y la determinación de tendencias climáticas históricas.

El comportamiento de los eventos de alta (interanual) y baja frecuencia (multianual) se relacionó con la influencia de patrones atmosféricos circulatorios, al correlacionar los datos reconstruidos con índices de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en sus fases cálida (El Niño) y fría (La Niña).

Como una verificación adicional para analizar el comportamiento regional del clima y su influencia en el volumen de agua captado en el LC, se utilizaron archivos históricos de la región que tuvieran alguna información de la presencia de acontecimientos hidroclimáticos extremos.

From the old-looking trees that were selected, cores were obtained by using a 666+Pressler borer from 35 to 75 cm long and 5.1 mm of internal diameter; samples were processed through standard dendrochronological methods (Stokes and Smiley, 1968) and every individual measurement was determined by a VELMEX system (Robinson and Evans, 1980). The "cross-dating", the quality of climatic response and accuracy of the measurement of each tree ring were checked by the COFECHA program (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). The biological and geometric trends not related to climate, were removed by the ARSTAN program (Cook, 1987).

In order to design a dendrochronological series that represents the regional hydroclimatic variation of the basin a Principal Component Analysis was used. The annual values of the maximal and minimal levels, of the maximal and minimal volumes and the difference between the maximal and minimal volumes on the records from 1900 to 2009 (Figure 2) were compared with a regional series of indexes of total ring width.

The relation between the former records and the growth series was quantified by several sub-periods. It was obtained directly, without making any variable transformation but with the necessary ones for their normalization, such as those of the logarithmic type, square root  $x^2$ , reversed ( $1/x$ ), among others (Brito *et al.*, 2003). The comparison period that resulted statistically significant was divided into two sub-periods for the calibration tests and the verification of the reconstruction model (Fritts, 1976).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Red dendrocronológica

A partir de las colectas realizadas se generaron nueve cronologías de anillo total de ahuehuete (Cuadro 1). El comportamiento interanual de las series fue variable, y la mayor correlación para el período 1900-2008 se produjo entre las cronologías Tizapán y La Cañada ( $r = 0.52$ ,  $n = 109$ ,  $p < 0.0001$ ), Tizapán y Atotonilco ( $r = 0.54$ ,  $p < 0.0001$ ), y La Cañada y Atotonilco ( $r = 0.4$ ,  $p < 0.0001$ ).

Resultados similares se obtuvieron mediante Análisis de Componentes Principales. Con base en lo anterior, las muestras de los tres sitios se integraron para formar una cronología representativa de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago.

Cuadro 1. Longitud de las cronologías de anillo total desarrolladas en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago.  
Table 1. Length of the chronologies of ring width chronologies developed for Lerma-Chapala- Santiago basin.

Nombre del sitio	Clave	Período	Años
Acatic, Jal.	ACA	1925-2008	84
Atotonilco, Jal.	ATO	1826-2006	181
La Cañada, Jal.	CAÑ	1741-2008	268
San José de Gracia, Mich.	SJG	1815-2008	194
San Miguel el Alto, Jal.	SMA	1864-2008	145
Ocotlán, Jal.	OCO	1860-2008	149
Rodeo, Jal.	ROD	1790-2008	219
Tizapán, Jal.	TIZ	1462-2008	547
Zapotlán del Rey, Jal.	CHI	1791-2008	218

El tamaño de muestra involucrado en la cronología regional se incrementó a partir de 1800 (>6) hasta llegar a 134 en la década más reciente (Figura 3).

De esta manera, para propósitos de discusión se enfatizó el período de 1800 a 2008; aunque el resto de la cronología (1462-1799) fue útil en el establecimiento de la variabilidad hidroclimática regional, la cual ha impactado los niveles del lago durante lapsos más extensos.

### Asociación entre la cronología regional y las variables del lago relacionadas con el volumen captado

Al contrastar los índices dendrocronológicos con algunos registros de medición implícitos en la definición de los volúmenes del lago, se observó que la diferencia de cota (recuperación anual del lago) y volumen, tanto del año actual como del previo al crecimiento del árbol, indicó una asociación positiva, cuyo incremento surgió al comparar el crecimiento del árbol con los valores de cota y volumen del año anterior (Cuadro 2). La asociación advertida implica que el crecimiento del sabino en esta región se relaciona mejor con las

The reconstruction was developed for the total length of the chronology; nevertheless, the period in which the sample size guaranteed that the reconstructed climatic sign had statistical reliability was emphasized. To the reconstructed period was applied a flexible ten-year curve in order to highlight low-frequency events such as dry and wet periods, and the determination of historic climatic trends.

The behavior of high (inter-annual) and low frequency (multiannual) events was related with the influence of circulatory patterns, while correlating the reconstructed data with ENSO indexes in their warm (El Niño) and cold (La Niña) phases.

As an additional verification to analyze the regional behavior of the climate and its influence upon the volume of water stored by LC, historical records of the region that had some information

about extreme hydroclimatic events were used.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Dendrology network

From the samples taken, nine ring width chronologies of cypress were built (Table 1). The inter-annual behavior of the series varied and the highest correlation for the 1900-2008 period occurred between the Tizapán and La Cañada ( $r = 0.52$ ,  $n = 109$ ,  $p < 0.0001$ ), Tizapán and Atotonilco ( $r = 0.54$ ,  $p < 0.0001$ ), and La Cañada and Atotonilco ( $r = 0.4$ ,  $p < 0.0001$ ) chronologies.

Similar results were obtained by Principal Component Analysis. Starting from this basis, the samples from the three sites were grouped into one representative chronology of the Lerma-Chapala-Santiago basin.

The sample size involved in the regional chronology increased from 1800 (>6 cores) until it reached 134 cores in the most recent decade (Figure 3).

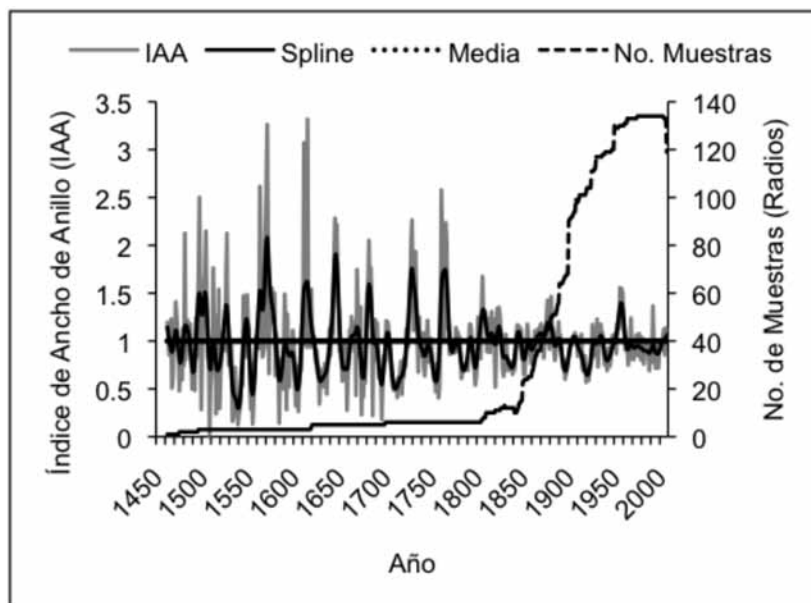


Figura 3. Cronología regional de anillo total de ahuehuete en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago y tamaño de muestra utilizado.

Figure 3. Regional chronology of total ring width's of cypress for Lerma-Chapala-Santiago basin and sample size used.

condiciones hídricas del año previo, lo cual se atribuye al aumento de los volúmenes de agua en los sistemas rivereños a finales de verano y durante el otoño, cuando el crecimiento del árbol es menor o ha cesado. De esta manera, la humedad almacenada en el suelo y la disponibilidad de mayores volúmenes en los ríos, debido a un incremento en el escurrimiento superficial y en el flujo base, promueven un desarrollo relativamente mayor del arbolado durante la siguiente estación de crecimiento (Villanueva *et al.*, 2005; Suzán-Aspiri *et al.*, 2007; Stahle *et al.*, 2011).

Se determinó el mejor período de asociación entre los índices dendrocronológicos (IAA) y los valores de recuperación anual del lago (diferencia de cota del año previo). La mejor asociación fue de 1959 a 2003 con una correlación de 0.783 ( $p < 0.00000$ ,  $n = 42$ ). Este período se dividió en dos subperíodos para propósitos de calibración y verificación del modelo.]

La calibración se realizó de 1959-1984 y explicó 62.4% de la variación anual ( $r = 0.79$ ,  $n = 22$ ,  $p < 0.0001$ ;  $r^2 = 0.624$ ); en tanto que la verificación, de 1985-2003 ( $r = 0.68$ ,  $n = 22$ ,  $p < 0.01$ ;  $r^2 = 0.462$ ). Dado que los dos subperíodos fueron significativos, se utilizó el período total de datos disponibles (1959-2003) para generar un modelo con propósitos de reconstrucción en la extensión total de la cronología (1462-2008). Los índices dendrocronológicos explicaron casi 61% de la variabilidad en los niveles anuales recuperados del lago, valor que resulta muy significativo ( $p < 0.0000$ ) (Cuadro 2). Asociación entre la serie dendrocronológica regional para la cuenca Lerma-Chapala-Santiago y las variables relacionadas con la disponibilidad de agua en el LC.

In this way, for discussion endings, the 1800 to 2008 period was emphasized; nevertheless, the rest of the chronology (1462-1799) was useful in the establishment of the regional hydroclimatic variability which has affected the levels of the lake during longer periods.

#### Relation between the regional chronology and the variables of the lake related to the stored volume

When comparing the dendrochronology indices with some measurement records that are implied in the definition of volumes of the lake, it was observed that the difference in level (annual recovery of the lake) and volume, from the present year as well as to that previous to the growth of the tree, it revealed a positive association, whose increment arose when comparing the growth of the tree with the level values and the volume of the year before (Table 2). The detected association implies that the growth of cypress in this region is better related with the water status in the previous year, which is explained by the increment of water volumes in the river systems at the end of summer and during autumn, when the growth of the tree is lower or has stopped. In this way, the moisture stored in the soil and the availability of greater water volumes in rivers, due to an increase in the runoff and basic flow, promote a rather good development of trees during the following growth season (Villanueva *et al.*, 2005; Suzán-Aspiri *et al.*, 2007; Stahle *et al.*, 2011).

For the reconstruction process, the best association period between dendrochronological indices (IAA) and the values of the annual recovery of the lake (difference of level from the

Cuadro 2. Relación entre la serie dendrocronológica regional para la cuenca Lerma-Chapala y variables relacionadas con la disponibilidad de agua en el LC.

Table 2. Relation between the regional dendrochronological series for the Lerma-Chapala-Santiago basin and the variables related to the availability of water in the LC.

Período		Cota	Cota	Vol	Área	Vol	Área	Dif	Dif	Dif	Dif	Área	Área
		Min	Max	Min	Min	Max	Max	Cota	Vol	Cota-1	Vol-1	Min-1	Max-1
1900-2008	IAA	-0.11	-0.01	-0.10	-0.09	-0.01	-0.10	0.20	0.17	0.32	0.26	-0.14	-0.20
1900-1959	IAA	-0.30	-0.11	-0.28	-0.12	-0.10	-0.24	0.27	0.23	0.28	0.21	-0.13	-0.36
1960-2008	IAA	0.15	0.16	0.16	0.13	0.16	0.10	0.03	0.05	0.44	0.40	-0.16	-0.16

Dif Cota= Se refiere a la diferencia entre el valor máximo y mínimo de cota alcanzado para un año específico; Dif Vol= Es la diferencia entre el volumen máximo y mínimo de captación para un año específico; Dif Cota-1= El índice de crecimiento de anillo total (IAA) para un año determinado se compara con la diferencia de cota del año previo; Dif Vol-1= El índice de crecimiento de anillo total (IAA) para un año determinado se compara con la diferencia en el volumen alcanzado para el año previo; Área Min-1= El índice de crecimiento de anillo total (IAA) para un año determinado se compara con el área mínima de inundación del año previo; Área Max-1= El índice de crecimiento de anillo total (IAA) para un año determinado se compara con el área máxima de inundación del año previo. Los valores en negritas son significativos al menos para una probabilidad de 95% (p<0.05).

Dif Cota-1t refers to the difference between the maximal and minimal level reached in a particular year; Dif Vol-1t is the difference between the maximal and minimal volume received in a particular year; Dif Cota-1= The total tree ring growth index (IAA) for a determined year is compared to the difference of level of the previous year; Dif Vol-1= The total tree ring growth index (IAA) for a determined year is compared to the difference of volume reached the previous year; Área Min-1= The total tree ring growth index (IAA) for a determined year is compared to the minimal flooding area of the previous year; Área Max-1= The total tree ring growth index (IAA) for a determined year is compared to the maximal flooding area of the previous year. The bold numbers are significant at least for a 95% (p<0.05) probability.

## Reconstrucción de la recuperación anual del lago

Con el programa *VERYFY* de la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona se efectuaron las pruebas de calibración-verificación del modelo (Cuadro 3). Ambas aprobaron la mayoría de las pruebas estadísticas, por lo que se consideraron aceptables para fines de reconstrucción. El modelo de regresión lineal creado fue el siguiente:

$$Y_t = 2.488 + 4.2907X_i$$

Donde:

$Y_t$  = Recuperación del lago (m) en el año "t"

$X_i$  = Índice de ancho de anillo

2.488 es la intersección al eje de las "X" y 4.2907 es la pendiente de la recta

Los valores anuales de la recuperación del lago se reconstruyeron para la longitud total de la cronología regional, que se extiende de 1462 a 2008 (Figura 4). Con el fin de resaltar los eventos de baja frecuencia presentes en la reconstrucción, a los datos reconstruidos se les insertó una línea flexible (*spline*) a nivel decenal.

year before). The best association was from 1959 to 2003 with a 0.783 (p<0.000000, n= 42) correlation. This period was divided into two sub-periods in order to apply calibration and verification of the model.

Calibration was made from 1959-1984, which explained 62.4% of the annual variation (r= 0.79, n = 22, p<0.00001; r<sup>2</sup> = 0.624) and verification of 1985-2003 (r= 0.68, n = 22, p<0.01; r<sup>2</sup> = 0.462). Since both sub-periods were significant, the total period of available data (1959-2003) was used to generate a model with reconstruction purposes in the total length of the chronology (1462-2008). The dendrochronologic indices explain near 61% of the variability in the annual recovered levels of the lake, a value that is highly significant (p<0.00000).

## Reconstruction of the annual recovery of the lake

With the *VERYFY* program of the Library of Dendrochronologic Programs of the University of Arizona the calibration-verification tests for the model were made (Table 3). Both approved most of the statistical tests, which were considered good for reconstruction endings. The linear regression model was the following:

$$Y_t = 2.488 + 4.2907X_i$$

Where:

$Y_t$  = Recovery of the lake (m) in the "t" year

$X_i$  = Tree- ring width index



Cuadro 3. Pruebas de Calibración-Verificación.

Table 3. Calibration-Verification tests.

Prueba de Calibración										
Período	R <sup>2</sup>	Coeficientes		Error Estándar		Prueba (t)		p		
		a	b	a	B	a	B	a	b	
1959 - 1984	0.60	-2.427	2.502	0.695	0.427	-3.49	5.85	0.002	0.000	
1985 - 2003	0.42	-1.234	1.661	0.599	0.440	-2.06	3.77	0.055	0.001	
1959 - 2003	0.60	-2.052	2.268	0.429	0.284	-4.78	7.98	0.000	0.000	

Prueba de Verificación					
Período	Correlación Pearson (r)	Reducción del error <sup>a</sup>	Valor de (t) <sup>b</sup>	Prueba de signos <sup>c</sup>	Primera diferencia significativa <sup>d</sup>
1959 - 1984	0.68*	0.704*	5.080*	1*	7 NS
1985 - 2003	0.79*	0.700*	1.665*	9	7 NS
1959 - 2003	0.78*	0.614*	1.864*	13*	15 NS

\* Significativo, p<0.05; NS = No Significativo, p>0.05

<sup>a</sup> No existe una prueba formal de significancia para este estadístico; sin embargo, cualquier resultado sobre cero indica que la reconstrucción contribuye solo con información paleoclimática (Fritts, 1976).

<sup>b</sup> Comparación apareada de las medias observadas y reconstruidas (Steel y Torrie, 1980).

<sup>c</sup> Se usa para comparar las diferencias entre dos muestras de datos tomados antes y después del tratamiento, cuyo valor central se espera que sea cero (Fritts, 1976).

<sup>d</sup> Primera diferencia de los datos advertidos y reconstruidos (t - t<sub>1</sub>) (Fritts, 1976).

\* Significant, p<0.05; NS = Non significant, p>0.05

<sup>a</sup> There is no formal significant test for this statistic; however, any results over zero means that the reconstruction makes a contribution only with paleoclimatic information (Fritts, 1976).

<sup>b</sup> Paired comparison of the observed and reconstructed means (Steel and Torrie, 1980).

<sup>c</sup> It is used to compare the differences between two data samples taken before and after their treatment, whose central value is expected to be zero (Fritts, 1976).

<sup>d</sup> First difference of the detected and reconstructed data (t - t-1) (Fritts, 1976).

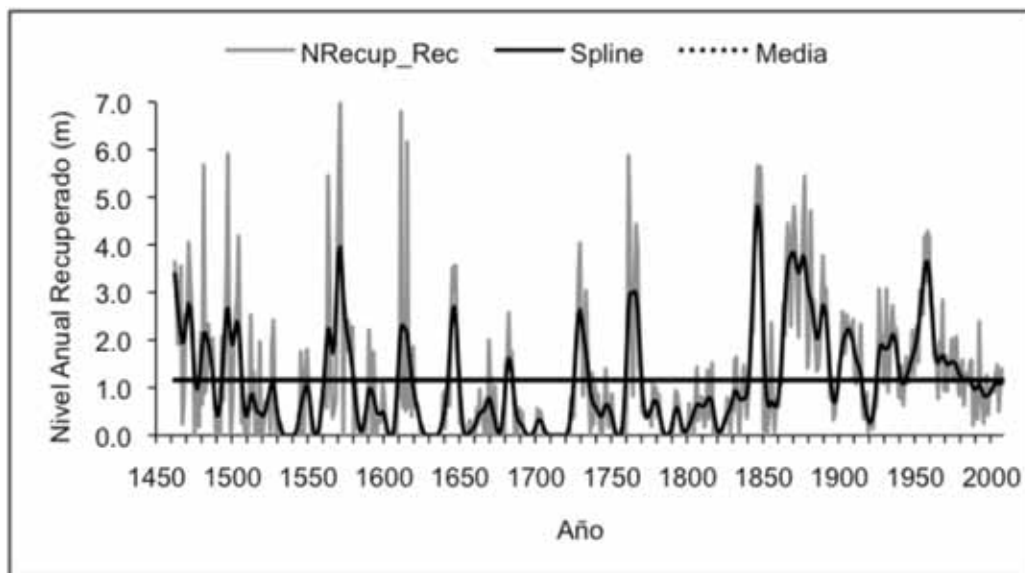


Figura 4. Valores anuales reconstruidos para el Lago de Chapala.

Figure 4. Reconstructed annual values for Chapala Lake.



La reconstrucción muestra varios años en los que la recuperación del nivel del lago fue cero; sin embargo, esto no indica la falta de aportación de volúmenes al mismo, sino que la diferencia entre su nivel mínimo (registrado entre el 30 de mayo y el 1 de julio de cada año) y máximo (consignado entre el 5 de septiembre y el 30 de noviembre de cada año) fue casi la misma. Esta situación sugiere escasa precipitación o de lluvia suficiente, pero con desviación de escurrimientos como ha sucedido en las últimas décadas (CEA, Jalisco, 2010).

Al analizar la reconstrucción se observaron períodos en los cuales la recuperación del lago, respecto a la media histórica (1.16 m), fue mínima o nula; tal es el caso de: 1533-1547, 1552-1556, 1584-1588, 1601-1608, 1624-1638, 1650-1660, 1674-1679, 1692-1700, 1704-1722, 1751-1759, 1783-1790, 1795-1800, 1817-1823, 1850-1853, 1894-1899 y 1919-1922. De 1922 en adelante, la reconstrucción detectó valores mínimos para años particulares como: 1965, 1979, 1982, 1988, 1989, 1991, 1994 a 1998 (excepto 1997), 2000, 2002 y 2005.

Archivos coloniales constatan algunas de estas sequías de gran magnitud que afectaron a la región. Del período 1533 a 1556 se presentó uno de los peores siniestros en el Valle de México aunado a epidemias que diezmaron notablemente la población indígena (Acuña-Soto *et al.*, 2002), que también afectó la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, de tal forma que en 1551 se cita gran escasez de grano en el municipio Zapotlán, Jalisco. De 1585 a 1587 se advierte una elevada mortandad de ganado en Guadalajara, Jal.; de 1602 a 1606 se verificó la presencia de plagas en cultivos que acabaron con las cosechas, y en los períodos de 1606-1637, 1649-1656 y 1751-1759 una carestía de alimentos por falta de lluvias (García *et al.*, 2003). Uno de los intervalos con mayor información, a causa de los estragos suscitados, es el de 1784-1791, cuando el problema se extendió a todo el país (Florescano, 1980); así, la falta de maíz fue muy severa en el Valle de México, en el estado de Jalisco y gran parte de la república mexicana, en particular en 1785 y 1786 (Florescano, 1986; Therrell *et al.*, 2006). Para el siglo XIX, se describen sequías en Jalisco durante las décadas 1810, 1840 y 1890 (Escobar, 1997), y para el siglo XX, las acaecidas en 1920, 1950-1960 y 2000 (CEA Jalisco, 2010).

Desde el punto de vista de su impacto negativo en la sociedad, los períodos húmedos se han registrado con poca frecuencia y son detectados con menor fidelidad por los árboles, ya que los sucesos más lluviosos ocurren en la estación de verano y durante el otoño, cuando su crecimiento es menor o ha cesado. Además, existen limitaciones en la capacidad de almacenamiento del suelo, pues una vez saturado el perfil, no permite una mayor captación de humedad y el agua adicional se pierde como escorrentía superficial o percolación profunda. Pese a lo anterior, en la reconstrucción se detectaron eventos húmedos en los siguientes años: 1493-1498, 1563-1564, 1612-1615, 1644-1649, 1728-1730, 1732-1734, 1761-1767, 1841-1849,

2.488 is the intersection to the "X" axis and 4.2907 is the slope of the curve

The annual values of the lake recovery were reconstructed for the total length of the regional chronology, that goes from 1462 to 2008 (Figure 4). In order to highlight the low frequency events present in the reconstruction, to the reconstructed data a flexible line ("spline") was inserted at a ten-year level.

Reconstruction shows several years in which the recovery of the level of the lake was zero; however, this does not mean that there is lack of input of water volumes to the lake, but that the difference between its minimal level (recorded between May 30<sup>th</sup> and July 1<sup>st</sup> of each year) and maximal level (recorded between September 5<sup>th</sup> and November 30<sup>th</sup> of every year) was almost the same. This situation suggests scarce or not enough rain, but with streamflow deviation, as it happened in the last decades (CEA Jalisco, 2010).

When analyzing the reconstruction, there were observed periods in which the recovery of the lake in regard to the historic mean (1.16 m) was minimal or non-existent, as it occurred in the following years: 1533-1547, 1552-1556, 1584-1588, 1601-1608, 1624-1638, 1650-1660, 1674-1679, 1692-1700, 1704-1722, 1751-1759, 1783-1790, 1795-1800, 1817-1823, 1850-1853, 1894-1899 and 1919-1922. From 1922 onwards, the reconstruction detected minimal values for specific years such as 1965, 1979, 1982, 1988, 1989, 1991, 1994 to 1998 (except for 1997), 2000, 2002 and 2005.

Some colonial documents confirm great droughts which affected the region. From the 1533 - 1556 period, took place one of the worst events in Valle de Mexico, in addition to the epidemics that notably reduced the indigenous population (Acuña-Soto *et al.*, 2002), that also affected the Lerma-Chapala-Santiago basin, in such a way that in 1551, a great grain shortage was registered in Zapotlán municipality, Jalisco. From 1585 to 1587 a high livestock mortality occurred in Guadalajara; from 1602 to 1606, insect outbreaks destroyed crops and during 1606-1637, 1649-1656 and 1751-1759, a lack of food due to the absence of rainfall (García *et al.*, 2003). One of the intervals with more information about the ravages was 1784-1791, when the crisis extended to the whole nation (Florescano, 1980); thus, there was a severe need for maize in Valle de Mexico, in the state of Jalisco and in a great part of Mexico, particularly in 1785 and 1786 (Florescano, 1986; Therrell *et al.*, 2006). Droughts are described for the XIX century in Jalisco during the 1810, 1840 and 1890 decades, and for the XX century, those in 1920, 1950-1960 and 2000 (CEA Jalisco, 2010).

From the viewpoint of its negative effect over society, the wet periods have been recorded with a low frequency and are detected with less accuracy by trees, since the more rainy events occur during summer and fall, when their growth is smaller or even has stopped. In addition, there are limitations in their soil

1863-1893, 1900-1910, 1926-1928, 1933-1938, 1946-1964 y 1972-1977. El período húmedo de 1493-1498 se presentó de forma simultánea en el Valle de México (Therrell *et al.*, 2006). En relación con la etapa de 1732 a 1734, se consignan lluvias excesivas que originaron siniestros en los cultivos de Amacueca, Jal.; caso similar ocurrió en Guadalajara, Jal. para los períodos 1779-1782 y 1795-1796. Durante el siglo XX, el año con más volumen de agua captado fue el de 1926, en el cual hubo una elevada recuperación del lago.

La variabilidad reconstruida de la recuperación del LC fluctuó a través del tiempo; así, la media del período total (1462-2008) fue de 1.16 m, con una desviación estándar de 1.32. Para los últimos 50 años (1959-2008), el promedio registrado superó al reconstruido histórico (1.29 m), pero la desviación estándar cayó a 0.60; esto sugiere que la variabilidad observada en la recuperación anual del lago ha disminuido en las últimas décadas, como consecuencia de un aprovechamiento excesivo del recurso hídrico. Este déficit de agua en los tributarios del LC ha provocado una reducción en el crecimiento de las especies riparias ahí presentes, como el ahuehuate, situación que compromete su conservación.

### Reconstrucción del volumen recuperado anual

El análisis de las fluctuaciones en los volúmenes de agua captados en el lago se determinó mediante un modelo lineal simple. La variación interanual en el volumen del LC se reconstruyó solo para el intervalo de 1800 a 2008, ya que fue el segmento de la cronología donde el número de muestras disponibles dió más confiabilidad estadística en los datos reconstruidos.

Para iniciar con el proceso de reconstrucción, se definió el mejor período de asociación entre los índices dendrocronológicos (IAA) y la diferencia entre los volúmenes del lago del año previo (Dif Vol-1), lo cual resultó de 1959 a 2000, con una correlación de 0.713 ( $p < 0.00001$ ).

El período total de datos de la diferencia en volumen se dividió en dos subperíodos para fines de calibración y verificación. La primera se realizó de 1981 a 2000 y explicó 52% de la variación ( $r = 0.72$ ,  $n = 20$ ,  $p < 0.00001$ ;  $r^2 = 0.52$ ), mientras la segunda se llevó a cabo de 1959 a 1979 ( $r = 0.71$ ,  $n = 19$ ,  $p < 0.00001$ ;  $r^2 = 0.50$ ). Las pruebas estadísticas de calibración-verificación fueron aceptables para propósitos de reconstrucción; de esta manera, el modelo generado en el total de los datos disponibles fue el siguiente:

$$Y_t = -2415.2 + 4183X_t$$



storage capacity, since once water holding capacity of the profile is saturated, it does not allow more moisture caption and the additional water is loss by runoff or deep percolation. In spite of this, in the reconstruction were detected wet events in the following years: 1493-1498, 1563-1564, 1612-1615, 1644-1649, 1728-1730, 1732-1734, 1761-1767, 1841-1849, 1863-1893, 1900-1910, 1926-1928, 1933-1938, 1946-1964 and 1972-1977. The 1493-1498 wet period occurred simultaneously in Valle de Mexico (Therrell *et al.*, 2006). In the 1732 - 1734 period, intense rainfall produced catastrophes in some crops of Amacueca, Jalisco; a similar case happened in Guadalajara, Jalisco for the 1779-1782 and 1795-1796 periods. During the XX century, 1926 was the year with greatest volume of water that was captured, which was coincidental with a high lake recovery.

The reconstructed variability of the recovery of LC fluctuated with time; therefore, the mean of the total period (1462-2008) was 1.16 m, with 1.32 of standard deviation. For the last 50 years (1959-2008), the average recorded value was even higher than the reconstructed (1.29 m), but the standard deviation fell to 0.60; this suggests that the observed variability in the annual recovery of the lake has diminished in the last decades, as a consequence of an excessive use of this resource. This water deficit in the tributaries of the lake has provoked a reduction in the riparian species that there exist, such as *Taxodium mucronatum*, a situation that commits its conservation.

### Reconstruction of the annual recovered volume

The analysis of the fluctuations of the water volumes captured by the lake was determined by a simple linear model. The inter-annual variation in the LC volume was reconstructed only for the 1800 to 2008 period, as the segment of the chronology where the number of available samples made it possible to have a greater statistical reliability in the reconstructed data.

In order to start the reconstruction process, a better association period between the dendrochronological indices (IAA) and the difference among the lake volumes of the year before (Dif Vol-1) was designed, which revealed the years from 1959 to 2000, with a correlation of 0.713 ( $p < 0.00001$ ).

The total period of data of the difference in volume was divided into two sub-periods for calibration and verification purposes. The first was made from 1981 to 2000 and it explained 52% of the variation ( $r = 0.72$ ,  $n = 20$ ,  $p < 0.00001$ ;  $r^2 = 0.52$ ), while the second was carried out from 1959 to 1979 ( $r = 0.71$ ,  $n = 19$ ,  $p < 0.00001$ ;  $r^2 = 0.50$ ). The statistical tests of calibration-verification were good for the reconstruction endings; in this way, the model that was generated in the total extent of available data was the following:

$$Y_t = -2415.2 + 4183X_t$$

Donde:

$Y_t$  = Diferencia en volumen contenido por el lago para el año "t"  
 $X_t$  = Índice de ancho de anillo  
 -2415.2 es la intersección al eje de las "X" y 4183 es la pendiente de la recta.

Where:

$Y_t$  = Difference of volume contained by the lake for the "t" year  
 $X_t$  = Tree-ring width index  
 -2415.2 is the intersection to the "X" axis and 4183 is the slope of the curve

La reconstrucción de los volúmenes del lago de 1800 a 2008 (209 años) reveló niveles inferiores al promedio ( $1623 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), como los ocurridos de 1819 a 1821, 1828 a 1842 (excepto 1831 y 1832), 1849 a 1853, 1858 a 1860, 1872 a 1873, 1892-1901, 1915 a 1925, 1939 a 1950 y 1969 a 2000 (Figura 5). Así mismo, en ella se detectó que los volúmenes captados de 1969 a 2000 en el LC deacrecieron por abajo de la media; sin embargo, se notó una ligera recuperación en los últimos ocho años. La precipitación promedio anual de la estación climática Chapala ( $20^\circ 118''$  latitud norte;  $103^\circ 12''$  longitud oeste de Greenwich; 1,523 m altitud) en el período 1935-2006, no indica cambios significativos en la precipitación promedio antes de 1970 (854 mm; desviación estándar 189.0). Esta caída en el volumen se explica por el aprovechamiento intensivo del agua en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, mismo, que por el contrario, debería estar aportando al LC.

The reconstruction of the volumes of the lake from 1800 to 2008 (209 years) revealed lower levels in regard to the average ( $1623 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), as it happened from 1819 to 1821, 1828 to 1842 (except for 1831 and 1832), 1849 to 1853, 1858 to 1860, 1872 to 1873, 1892 to 1893, 1892 to 1901, 1915 to 1925, 1939 to 1950 and 1969 to 2000 (Figure 5). Also, it was found in it that the volumes captured from 1969 to 2000 in LC decreased under the average; however, a slight recovery was noticed in the last eight years. The average annual precipitation of the Chapala climate station ( $20^\circ 118''$  north;  $103^\circ 12''$  west; 1,523 masl) in the 1935-2006 period does not show significant changes in the average precipitation before 1970 (854 mm; 189.0 as standard deviation). This fall in volume is explained by the intensive use of water in the Lerma-Chapala-Santiago basin, which, on the other hand, must be received by LC.

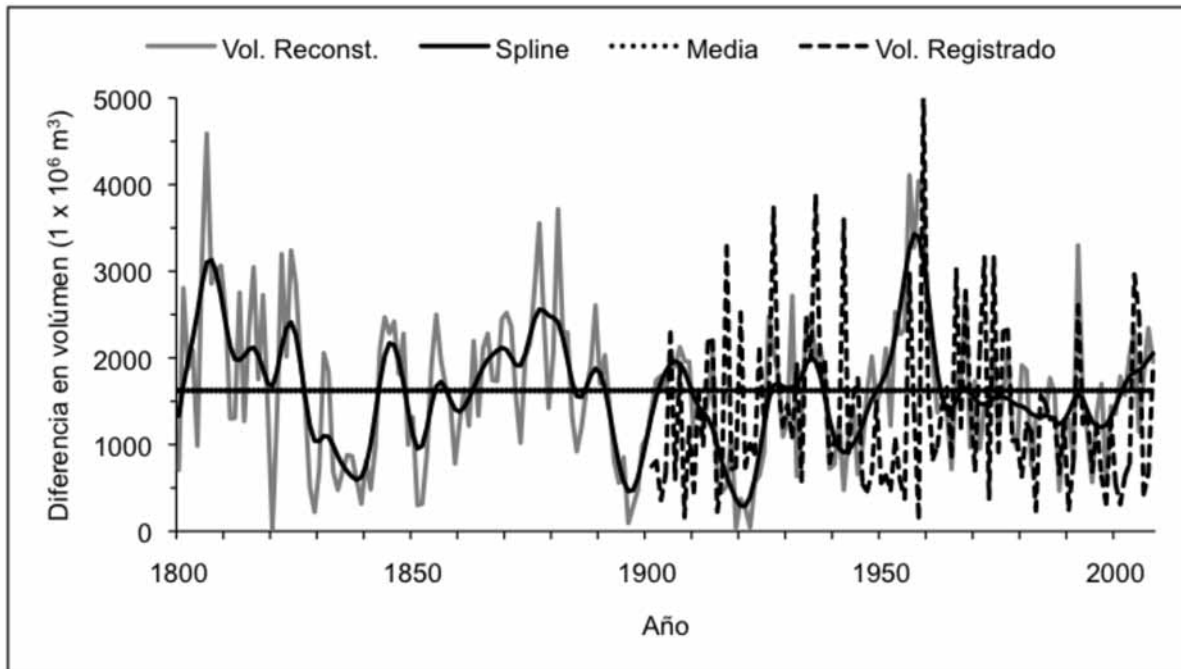


Figura 5. Reconstrucción del volumen anual recuperado del Lago de Chapala para los últimos 209 años (1800-2008).  
 Figure 5. Reconstruction of the recovered annual volume of Chapala Lake for the last 209 years (1800-2008).

## Influencia de El Niño Oscilación del Sur

Gran parte de la variabilidad interanual y multianual del clima en México es modulada por ENSO (Ropelewski y Halpert, 1987; Magaña *et al.*, 1999). El impacto de ese fenómeno no es similar en todo el país, pues en algunas regiones del norte y noreste su influencia es más significativa (Stahle *et al.*, 1998; Cerano *et al.*, 2009; Yocom *et al.*, 2010), particularmente durante la fase cálida, en la que provoca lluvias abundantes durante la época invernal y en ciclos que fluctúan de cuatro hasta 32 años (Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2009).

La relación entre los índices ENSO no fue significativa respecto a los datos reconstruidos; sin embargo, se determinó que acontecimientos catalogados como Niños intensos cálidos, sí afectaron los niveles y volúmenes del lago, lo que permitió su recuperación. Ejemplos específicos son los años siguientes: 1844-1845, 1877-1878, 1902, 1905, 1907, 1925-1926, 1930-1931, 1957-1958, 1987, 1992 y 1997, con recuperaciones del lago que fueron superiores a 300%, en particular 1844-1845, 1877-1878, 1925-1926, 1957-58, 1992 y 1997.

Por otra parte, eventos secos con escasa o nula recuperación del lago como los ocurridos en los intervalos de 1950-1951, 1964-1965, 1973-1974, 1975-1976, 1988-1989 y 1998-1999, se relacionaron con ENSO en su fase fría.

## CONCLUSIONES

En este estudio se desarrolló una red de nueve cronologías de ahuehuete, con especímenes localizados en parajes de bosques de galería en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. Las cronologías con una respuesta climática común (Tizapán, La Cañada, Atotonilco) se integraron en una cronología regional para reconstruir la variabilidad hidroclimática interanual y multianual, la cual ha caracterizado al LC, antes de la disponibilidad de registros instrumentales. La cronología regional se asoció de modo significativo con la recuperación de los niveles y volúmenes del lago, un año anterior al crecimiento del árbol. De esta manera, y con base en un modelo lineal, se efectuó una reconstrucción de la recuperación del lago sobre los últimos 457 años (1462-2008) y otra de volumen recuperado de los últimos 209 años (1800-2008). Dichas reconstrucciones detectaron períodos muy secos de baja recuperación del lago, en frecuencias dominantes de 20 a 25 años. La mayoría de las sequías, particularmente aquellas de alta intensidad, provocaron hambrunas, epidemias y mortandad de ganado en toda la región, sucesos que fueron consignados en archivos históricos. La sequía más documentada ocurrió entre 1785 y 1786, y afectó una extensa parte del territorio nacional.

No se encontró una influencia significativa de ENSO, excepto para eventos de alta intensidad que provocaron lluvias abundantes durante su fase cálida y sequías agudas en su fase fría.

## Influence of El Niño Southern Oscillation

A good part of the inter-annual and multiannual variability of the climate in Mexico is moderated by ENSO (Ropelewski and Halpert, 1987; Magaña *et al.*, 1999). The impact of this phenomenon is not the same in the whole country, as in some northern and northeastern regions it has a more significant influence (Stahle *et al.*, 1998; Cerano *et al.*, 2009; Yocom *et al.*, 2010), in particular during the warm phase, in which it provokes abundant rain in winter and in cycles that vary from 4 to 32 years (Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2009).

The relation among the ENSO indices was non-significant in regard to the reconstructed data; however, it was found that events that are ranked as intense warm ENSO events did affect the lake levels and volumes which favored their recovery. Specific examples are the following: 1844-1845, 1877-1878, 1902, 1905, 1907, 1925-1926, 1930-1931, 1957-1958, 1987, 1992 and 1997, with recoveries of the lake that were over 300%, in particular 1844-1845, 1877-1878, 1925-1926, 1957-58, 1992 and 1997.

On the other hand, dry events with very little or no lake recovery such as those that occurred in 1950-1951, 1964-1965, 1973-1974, 1975-1976, 1988-1989 and 1998-1999, were related with ENSO in its cold phase.

## CONCLUSIONS

A network of nine chronologies of *Taxodium mucronatum* was developed in this study, with specimens located in riparian streams of the Lerma-Chapala-Santiago basin. The chronologies with a climatic common response (Tizapán, La Cañada, Atotonilco) were grouped into a regional chronology to reconstruct the inter-annual and multiannual hydroclimatic variability characteristic of LC, before the availability of instrumental records. The regional chronology was significantly associated with the recovery of the levels and volumes of the lake, a year before the growth of the tree. In this way, and starting from the linear model, a reconstruction of the recovery of the lake of the last 457 years (1462-2008) was made as another of the recovered volume of the last 209 years (1800-2008). Such reconstructions detected very dry periods of low recovery of the lake, in dominant frequencies of 20 to 25 years. Most droughts, in particular those of high intensity, provoked hunger, epidemics and death of livestock in a whole region, events that were registered in historical records. The most documented drought took place between 1785 and 1786, and impacted a great part of the nation.

A significant influence of ENSO was not found, except for intense events that provoked abundant rains during its warm phase and severe droughts in its cold phase.

Los niveles reconstruidos del lago de Chapala indicaron una variabilidad elevada, previo a la década de 1970; no obstante, que decayó en los últimos 30 años, a consecuencia de desviaciones del flujo para distintos usos; por lo tanto, el lago no ha sido capaz de alcanzar los niveles históricos detectados en la reconstrucción. Los anillos anuales del ahuehuete fueron sensibles a dicho cambio, lo cual se refleja en un menor tamaño, circunstancia que pone en peligro su permanencia en estos ecosistemas.

Las reconstrucciones desarrolladas proporcionan información histórica sobre la variabilidad hidrológica de la cuenca, así como de su influencia en la disponibilidad de los recursos hídricos del LC. Así pues, este conocimiento es de utilidad para implementar acciones encaminadas a conservarlo, ya que es icono de tranquilidad y belleza escénica de esa región de México. 🌳

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento otorgado a través de fondos del Instituto Interamericano para Investigación del Cambio Climático (IAI), proyecto CRN # 2047, a la vez financiado por el US/National 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.
- Brito-Castillo, L., D. Diaz-Castro, C. A. Salinas-Zavala and A. V. Douglas. 2003. Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed. *Journal of Hydrology* 278:39-50.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., P. Z. Fulé, J. G. Arreola A., I. Sánchez C. y R. D. Valdez. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 15(2):27-44.
- Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA Jalisco). 2010. Niveles máximos y mínimos del lago de Chapala <http://www.ceajalisco.gob.mx/sia/niveles/niveles.html> (1 de diciembre de 2010).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2008. Estadísticas del agua en México. México, D.F. México. 228 p.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47:37-59.
- Díaz C., S., M. D. Therrell, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland. 2002. Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research*. 22:237-244.
- Florescano, E. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México, D.F. México. 121 p.
- Florescano, E. 1986. Precios del maíz y crisis agrícolas en México: 1708-1810. Ediciones Era. México, D.F. México. 236 p.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree-rings and climate*. Academic Press. New York, NY USA. 567 p.
- García A., V., J. M. Pérez Z., A. Molina del Villar. 2003. Desastres agrícolas en México: Catálogo histórico. 1. Épocas prehistórica y colonial (958-1822). FCE, CIESAS. México, D.F., México. 506 p.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57 (2):205-221.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*. 43:69-78

The reconstructed levels of Chapala lake showed a high variability before the 70's; nevertheless, this variability decayed in the last 30 years, as a result of streamflow deviations for several uses, a fact that has prevented that the lake reaches the historic levels identified by the reconstruction. The annual tree-rings of cypress were sensitive to this change, which became smaller in size, a circumstance that puts at risk its permanence in these ecosystems.

The reconstructions here developed provide historical information about the hydroclimatic variability of the basin, as well as its influence upon the availability of water resources of LC. So, this knowledge is useful to implement actions oriented to preserve this lake, an icon of peacefulness and scenic beauty of this Mexican region. 🌳

## ACKNOWLEDGEMENTS

It was possible to accomplish this work thanks to the financial funding supported by the Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), CRN # 2047 project, also supported by the US/National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

*End of the English version*



- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2003. Diagnóstico biofísico y socio-económico de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. Resumen ejecutivo. INE. Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas. México, D.F. México. 32 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.
- Robinson, W. J. and R. Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system *Tree-Ring Bulletin*. 40:59-64.
- Ropelewski C. F. and M. S. Halpert. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115:1606-1626.
- Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Nike, J. Nakumara, C. Lie, E. Cook and D.W. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22 (1):1-31.
- 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 L. G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 70 (10): 2137-2152.
- Stahle, D. W., J. Villanueva-Díaz, D. J. Burnette, J. Cerano-Paredes, R. R. Heim Jr., F. K. Fye, R. Auna-Soto, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland and D. K. Stahle. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters* 38, L05703:1-4.
- Steel, R. G. D. and J. H. Torrie. 1980. Principles and procedures of statistics: A biometrical approach. McGraw-Hill. Kogakusha, Tokyo Japan. 633 p.
- Stokes, M. A. and T.L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. The University of Chicago. Chicago, IL USA. 73 p.
- Suzán-Aspiri, H., G. Enríquez-Peña and G. Malda-Barrera. 2007. Population structure of the Mexican baldcypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) en Querétaro, México. *Forest Ecology and Management* 242: 243-249.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, J. Villanueva-Díaz, E. Cornejo-Oviedo and M. K. Cleaveland. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central México. *Climatic Change* 74:493-504.
- Villanueva D., J., B. H. Luckman, D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, J. Cerano-P., G. Gutiérrez-G., J. Estrada-Á. and R. Jasso-I. 2005. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrocronología* 22 (3):215-223.
- 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.
- Yocom, L. L., P. Z. Fulé, P. M. Brown, J. Cerano-P., J. Villanueva-D., D. A. Falk and E. Cornejo-O. 2010. El Niño Southern Oscillation effect on fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology* 9 (16):1660-1671.
- Wiles, G. C., A. C. Krawler and R. D'Arrigo. 2009. A 265-year reconstruction of Lake Erie water levels based on North Pacific tree rings. *Geophysical Research Letters* 36: 10.1029/2009GL037164.