

CINCO SIGLOS DE HISTORIA DENDROCRONOLÓGICA DE LOS AHUEHUETES (*Taxodium mucronatum* Ten.) DEL PARQUE EL CONTADOR, SAN SALVADOR ATENCO, ESTADO DE MÉXICO

FIVE CENTURIES OF DENDROCHRONOLOGICAL HISTORY OF THE MONTEZUMA CYPRESS (*Taxodium mucronatum* Ten.) AT THE EL CONTADOR PARK, SAN SALVADOR ATENCO, ESTADO DE MÉXICO

José Villanueva-Díaz¹, Julián Cerano-Paredes¹, Armando Gómez-Guerrero^{2*}, Arian Correa-Díaz²,
Luis U. Castruita-Esparza², Rosalinda Cervantes-Martínez¹, David W. Stahle³, Aldo R. Martínez-Sifuentes¹

¹Laboratorio de Dendrocronología, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Gómez Palacio, Durango, México. ²Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (agomezg@colpos.mx). ³Department of Geosciences, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas, USA.

RESUMEN

La reconstrucción de la variabilidad climática por medio de anillos de crecimiento es una técnica que permite estudiar el clima y el crecimiento arbóreo del pasado. Con la finalidad de recuperar información dendroclimática, en el parque El Contador, San Salvador Atenco, Estado de México, se analizaron restos de árboles de ahuehuate (*Taxodium mucronatum* Ten.) del siglo XV y núcleos de crecimiento de árboles vivos en el área de influencia del parque. Las muestras se analizaron con técnicas dendrocronológicas estándar, para lo cual fue validado estadísticamente el cofechado entre secciones y núcleos. La correlación con variables climáticas se basó en registros de lluvia de estaciones climáticas aledañas al sitio. La cronología del parque El Contador (PCO) fue comparada con las del parque Chapultepec, ciudad de México (PCHA) y Amealco, Querétaro (AMQ), para identificar eventos extremos en común. El ancho total del anillo se explica por la precipitación de enero a junio; la reducción de 55 % de ésta, de 225 a 100 mm después de 1985, coadyuvó a la reducción de 85 % del crecimiento en área basal. Se confirmó que los árboles del parque son de la época de Nezahualcōyotl (1402-1472) y su desaparición ha sido gradual. Esta eliminación muestra correlación significativa con el agotamiento de los mantos freáticos del Valle de México. La correlación entre las cronologías PCO, PCHA y AMQ no fue significativa. En el primer caso, influyeron los riegos complementarios al arbolado y la diferencia climática entre localidades en el segundo caso. La serie dendrocronológica PCO permitió conocer la

ABSTRACT

The reconstruction of climatic variability by means of tree rings is a technique that makes it possible to study climate and tree growth of the past. In order to recover dendroclimatic information in the El Contador park, San Salvador Atenco, Estado de Mexico, analyses were made of Montezuma cypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) remnants of the XV century and wood cores of live trees in the area of influence of the park. The samples were analyzed with standard dendrochronological techniques, for which co-dating was statistically validated among sections and wood cores. The correlation with climatic variables was based on rainfall records of climatic stations in the vicinity of the study site. The chronology of the El Contador park (PCO) was compared with those of Chapultepec park, Mexico City (PCHA), and Amealco, Querétaro (AMQ), to identify extreme events in common. Total ring width is explained by the precipitation of January to June; its reduction of 55 %, from 225 to 100 mm after 1985, contributed to the 85 % reduction of growth in the basal area. It was confirmed that the trees of the park are of the period of Nezahualcōyotl (1402-1472) and their disappearance has been gradual. This elimination shows significant correlation with the depletion of the groundwater of the Valley of Mexico. The correlation among the PCO, PCHA and AMQ chronologies was not significant. In the first case, there was influence of the complementary irrigations to the trees and the climatic difference among localities in the second case. The PCO dendrochronological series showed the climatic variability of the area of influence of the Ex Lake of Texcoco and the radial growth of Montezuma cypresses. The information is relevant for the conservation of this species in

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2013. Aprobado: septiembre, 2014.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 48: 725-737. 2014.

variabilidad climática del área de influencia del Ex Lago Texcoco y el crecimiento radial de ahuehuetes. La información es relevante para la conservación de esta especie en su ámbito natural y en plantaciones con propósitos estéticos, farmacéuticos o de restauración ecológica, así como de valor histórico.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, árboles longevos, dendroclimatología, sabino, variabilidad climática.

INTRODUCCIÓN

Un sitio emblemático de ahuehuate (*Taxodium mucronatum* Ten.) con alto significado histórico, es el parque “El Contador”, ubicado en el municipio de San Salvador Atenco, Estado de México, al oriente del Valle de México (Heyden, 2002). En la periferia de este parque, de 800 m de longitud por 400 m de anchura, se plantaron en tiempos prehispánicos unos 2000 árboles de ahuehuate, dispuestos en forma de un cuadrilátero. De acuerdo con datos históricos sirvieron para embellecer y delimitar uno de los jardines preferidos del rey Nezahualcóyotl (1402-1472) (De Alva, 1891; De Motolinia, 2008). El desarrollo de esta plantación de árboles pudo verse favorecido por el clima estable, la cercanía del Lago de Texcoco, un manto freático superficial y posiblemente por el suministro de agua al arbolado joven en época de estiaje, ya que existían estanques y acequias dentro del parque (De Alva, 1891). El ahuehuate también era apreciado en la antigüedad por su uso en la medicina herbolaria. Estudios científicos corroboran su potencial para el tratamiento de padecimientos respiratorios, gástricos (Cortés-Arroyo *et al.*, 2011) y como antibacteriano (Luján-Hidalgo *et al.*, 2012).

El número de árboles vivos se redujo drásticamente a través de los siglos con un remanente aproximado de 500 individuos en 1850 (Meyer, 1853), 310 en 1925 (Vélez, 1925) y 275 en 1949 (Martínez, 1963). En la actualidad no sobreviven especímenes de ahuehuate en su delineación original y sólo se aprecia el remanente de trozas, ramas gruesas y tocones debido al aprovechamiento maderable a que fue sujeto el arbolado después de muerto. Esta población no se valoró desde un punto de vista histórico. Además se carece de estudios de diversidad genética en ella, contrario a otros países donde, como especie exótica, se ha estudiado genéticamente en poblaciones reducidas mediante marcadores moleculares (Dong-qin *et al.*, 2012).

its natural surroundings and in plantations with aesthetic or pharmaceutical purposes, as well as for ecological restoration and historic value.

Key words: Growth rings, long-living trees, dendroclimatology, Montezuma cypress, climatic variability.

INTRODUCTION

The “El Contador” park is an emblematic site of the Montezuma cypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) with high historic significance. It is located in the municipality of San Salvador Atenco, State of México, in the eastern end of the Valley of Mexico (Heyden, 2002). At the edge of this park, measuring 800 m length by 400 m width, approximately 2000 Montezuma cypress trees were planted during the prehispanic era in a quadrilateral layout. According to historic data, they served to embellish and to limit one of the favorite gardens of king Nezahualcoyotl (1402-1472) (De Alva, 1891; De Motolinia, 2008). The development of this tree plantation may have been favored by the stable climate, proximity to Lake Texcoco, superficial groundwater and possibly irrigation of the tree stand in the dry season, given that there were ponds and reservoirs within the park (De Alva, 1891). The Montezuma cypress was also valued in ancient times for its use in herbal medicine. Scientific studies confirm its potential for the treatment of respiratory and gastric ailments (Cortés-Arroyo *et al.*, 2011) and for its antibacterial properties (Luján-Hidalgo *et al.*, 2012).

The number of live trees was drastically reduced throughout the centuries with approximately 500 individuals remaining in 1850 (Meyer, 1853), 310 in 1925 (Vélez, 1925) and 275 in 1949 (Martínez, 1963). At present there are no surviving specimens of Montezuma cypress in their original layout, and only the remnants of sections, thick branches and stumps remain, due to the lumber cutting which took place after the stand was dead. This population was not valued from an historic point of view. Furthermore, no studies of genetic variability have been made on it, contrary to other countries where it has been studied genetically as an exotic species, in reduced populations by means of molecular markers (Dong-qin *et al.*, 2012).

In 2013, the directive council of the park decided to relocate a dozen tree sections which for various

En 2013, el consejo directivo del parque decidió reubicar una decena de trozas que por varias décadas permanecieron olvidadas, después de resistir el proceso de descomposición natural y la persistencia de visitantes para usarlas en fogatas. El material muerto de estos individuos centenarios no se ha estudiado a pesar de su gran valía científica, ya que en sus anillos de crecimiento están registrados los eventos climáticos y dinámica de crecimiento de la especie en el Valle de México.

La información de estas trozas es útil para comprender la variación del clima y la conservación de otros sitios históricos o naturales con ahuehuetes. A pesar de que estos árboles datan de la época de Nezahualcōyotl, no se han realizado estudios científicos con una muestra compuesta de secciones transversales y núcleos de árboles vivos para corroborar este hecho. Los objetivos de este estudio fueron: 1) desarrollar una serie dendrocronológica de anillo total de ahuehuate, con secciones trasversales preservadas del parque El Contador (PCO) y núcleos de crecimiento de arbolado muerto y vivo de sitios aledaños, para definir la edad más probable del arbolado; 2) correlacionar los índices de ancho de anillo del PCO con la precipitación y reconstruir la variabilidad del pasado; 3) comparar la cronología PCO con la del parque de Chapultepec (PCHA) de la Ciudad de México y la localidad de Amealco, Querétaro (AMQ), para identificar correspondencia de eventos climáticos extremos. Las hipótesis probadas fueron: 1) Las cronologías de trozas remanentes de ahuehuetes del PCO muestran evidencias científicas de que el arbolado se estableció entre 1450 y 1500; 2) con la cronología del PCO se puede reconstruir el clima del centro de México de los últimos cinco siglos; 3) las cronologías de ahuehuate del PCO, PCHA y AMQ, muestran correlación estadísticamente significativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El centro del parque El Contador se ubica al sureste del municipio de San Salvador Atenco, en 19° 32' 43.1" N y 98° 55' 23" O, a una altitud de 2255 m (Figura 1). El clima del lugar es templado subhúmedo con una temperatura media de 15.1 °C, máxima de 33.5 °C y mínima de 11.0 °C y una precipitación promedio anual de 604 mm, con la mayor cantidad de lluvia en verano (Jáuregui, 2002).

decades had remained forgotten, after resisting the process of natural decomposition and the persistence of visitors who used them in campfires. The dead material of these centenarian individuals has not been studied despite their great scientific value, given that their growth rings register the climatic events and growth dynamic of the species in the Valley of Mexico.

The information of these sections is useful for understanding the climate variation and conservation of other historic or natural sites with Montezuma cypress. Although these trees date to the period of Nezahualcōyotl, scientific studies have not been made with a sample comprised of transversal sections and nuclei of live trees to confirm this information. The objectives of the present study were as follows: 1) to develop a total ring dendrochronological series of Montezuma cypress, with preserved transversal sections from the El Contador park (PCO) and growth nuclei from dead and live trees of neighboring sites, to define the most probable age of the trees; 2) to correlate the ring width indexes of the PCO with precipitation and reconstruct the variable of the past; 3) to compare the PCO chronology with that of Chapultepec park (PCHA) of Mexico City and the locality of Amealco, Querétaro (AMQ), to identify correspondence of extreme climatic events. The hypotheses tested were: 1) The chronologies of remnant sections of Montezuma cypresses of the PCO show scientific evidence that the stand was established between 1450 and 1500; 2) with the chronology of the PCO it is possible to reconstruct the climate of central Mexico of the past five centuries; 3) the Montezuma cypress chronologies of the PCO, PCHA and AMQ show statistically significant correlation.

MATERIALS AND METHODS

Site study

The center of El Contador park is located to the southwest of the municipality of San Salvador Atenco, at 19° 32' 43.1" N and 98° 55' 23" W, at an elevation of 2255 m (Figure 1). The climate of the site is temperate subhumid with a mean temperature of 15.1 °C, maximum of 33.5 °C and minimum of 11.0 °C and an average annual rainfall of 604 mm, with most of the rains in summer (Jáuregui, 2002).

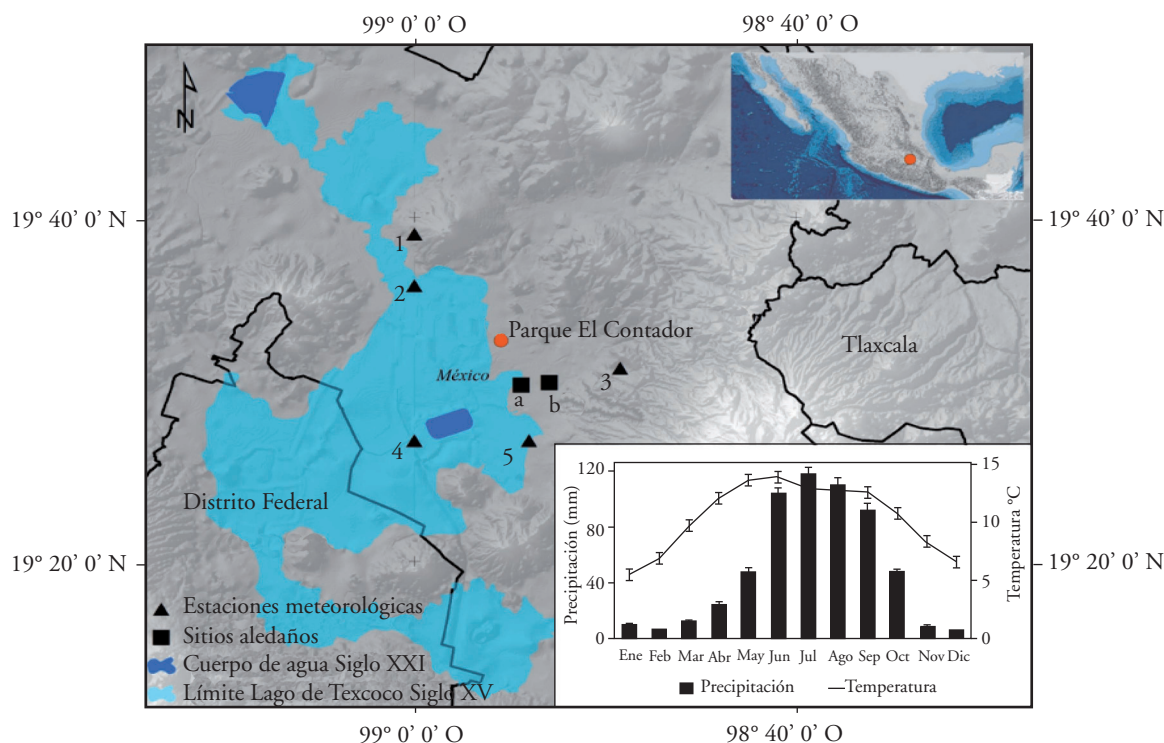


Figura 1. Ubicación del Parque el Contador y Lago Texcoco. En tono gris claro, se muestra la extensión original de Lago Texcoco en el siglo XV y los cuerpos de agua remanentes a la fecha en gris oscuro. Las estaciones meteorológicas se indican con triángulos negros donde: 1= Chiconautla, Ecatepec, 2= Nezahualcóyotl, 3= San Miguel Tlaixpan, 4= Campamento Lago de Texcoco, y 5= El Tejocote. Los sitios aledaños de muestreo de arbolado vivo se indican con cuadros negros, donde a= San Felipe, b= Texcoco. El climograma interior corresponde a datos promedios mensuales de temperatura y precipitación con su error estándar.

Figure 1. Location of the El Contador Park and Lake Texcoco. The original extension of Lake Texcoco in the XV century is shown in light grey, and the remnant bodies of water of the present are shown in dark grey. The meteorological stations are indicated with black triangles where: 1= Chiconautla, Ecatepec, 2= Nezahualcóyotl, 3= San Miguel Tlaixpan, 4= Lake Texcoco camp, and 5= El Tejocote. The neighboring sampling sites of live trees are indicated with black squares, where a= San Felipe, b= Texcoco. The interior graph corresponds to average monthly data of temperature and rainfall with their standard error.

Recolección de secciones trasversales y virutas

Con una motosierra marca Stihl, modelo Ms660, se obtuvieron 14 secciones trasversales de fuste y tres de ramas gruesas con un grosor aproximado de 5 cm. Por el tamaño y peso de las trozas se usaron grúas para tomar las muestras. También se obtuvieron ocho núcleos de crecimiento en trozas (uno por troza) remanentes dentro del parque y 20 de árboles vivos en las localidades de Texcoco, San Felipe y San Salvador Atenco, Estado de México, con un taladro de Pressler de 12 mm de diámetro interno y 46.7 cm de longitud, marca Haglöf, modelo BS009. El muestreo de árboles fue indispensable para determinar con exactitud el crecimiento del año actual y realizar el traslape de anillos entre individuos vivos y definir las fechas de establecimiento y muerte de los árboles. Con 17 secciones de arbolado viejo y 20 virutas de

Collection of transversal sections and plugs

A Stihl chainsaw, model Ms660, was used to obtain 14 transversal sections of trunk and three of thick branches, with an approximate thickness of 5 cm. Due to the size and thickness of the section, cranes were used to take the samples. In addition, eight growth nuclei were obtained (one per section) from remnant sections in the park and 20 from live trees in the localities of Texcoco, San Felipe and San Salvador Atenco, State of Mexico, with a Pressler drill, with 12 mm internal diameter and 46.7 cm length, Haglöf model BS009. The tree sampling was indispensable to precisely determine the present annual growth and to carry out the overlap of rings among live individuals and to define the dates of establishment and death of the trees. With 17 sections of old trees and 20 plugs of new trees,

arbolado vivo se reunió una muestra estadísticamente válida para la construcción de la cronología, ya que los estudios dendrocronológicos se pueden sustentar con 10 series (McCarroll y Loader, 2004; Leatvitt, 2010; Brien *et al.*, 2012; Mérian *et al.*, 2013).

Generación de la cronología de anillo total

Los núcleos de crecimiento y secciones transversales se pulieron con lija de granulometría gruesa a fina (granos 120 a 1200), para resaltar sus crecimientos. Los anillos se contaron y fecharon con técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968) en el laboratorio de Dendrocronología del INIFAP en Gómez Palacio, Durango. El grosor de cada crecimiento individual (anillo total) se cuantificó con un sistema de medición Velmex resolución a 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980). El fechado y medición fue verificado estadísticamente con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las tendencias biológicas no relacionadas con clima se removieron con el programa ARSTAN, el cual calcula los índices normalizados (cronologías) con media 1.0 y varianza homogénea mediante un modelo exponencial (Cook, 1987). La normalización se hace con respecto al modelo exponencial ajustado que describe los cambios en ancho de anillo.

Correlación de anillo total con otras series y precipitación

La cronología PCO se comparó con las del PCHA y AMQ, para evaluar la consistencia entre ellas (Stahle *et al.*, 2011). Aunque los factores de cada localidad influyen en el grosor de los anillos, los eventos extremos, en particular sequías, se registran en una misma especie en escalas geográficas importantes (Stahle *et al.*, 2000).

La cronología de ahuehuete PCO se correlacionó con registros de lluvia de estaciones meteorológicas aledañas al sitio de recolección mediante la subrutina VERIFYF5 de la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (Fritts, 1991). Las estaciones meteorológicas se listan en el Cuadro 1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Serie de anillo total de PCO e índices de ancho de anillo

El material que cumplió con los estándares dendrocronológicos (Stokes y Smiley, 1968) fue integrado con 17 secciones de arbolado muerto y 20 núcleos de crecimiento de árboles vivos. La serie de anillo total del ahuehuete se extendió de 1521 a 2012 (492 años). La serie de índices de ancho de anillo en

a statistically valid sample was gathered for the reconstruction of the chronology, given that the dendrochronological studies can be sustained with 10 series (McCarroll and Loader, 2004; Leatvitt, 2010; Brien *et al.*, 2012; Mérian *et al.*, 2013).

Generation of total ring chronology

Growth ring nuclei and transversal sections were polished with thick to fine sandpaper (120 to 1200), to enhance the contrast of growth rings. The rings were counted and dated with standard dendrochronological techniques (Stokes and Smiley, 1968) in the Dendrochronology laboratory of the INIFAP in Gómez Palacio, Durango. The thickness of each individual growth (total ring) was quantified with a Velmex measurement system, with resolution to 0.001 mm (Robinson and Evans, 1980). The dating and measurement was statistically verified with the program COFECHA (Holmes, 1983). The biological tendencies unrelated to climate were removed with the program ARSTAN, which calculates the normalized indices (chronologies) with mean 1.0 and homogeneous variance through an exponential model (Cook, 1987). The normalization is made with respect to the adjusted exponential model that describes the changes in ring width.

Correlation of total ring with other series and rainfall

The PCO chronology was compared with those of PCHA and AMQ, to evaluate the consistency among them (Stahle *et al.*, 2011). Although the factors of each locality influenced ring thickness, extreme events, particularly droughts, are registered in a same species in important geographical scales (Stahle *et al.*, 2000).

The chronology of PCO Montezuma cypress was correlated with rainfall records of neighboring meteorological stations using the subroutine VERIFYF5 of the Dendrochronological

Cuadro 1. Relación de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.

Table 1. List of meteorological stations close to the study area.

Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (msnm)
Chiconautla, Ecatepec	19.65°	99.00°	2245
Nezahualcōyotl	19.60°	99.00°	2233
San Miguel Tlaixpan, Texcoco	19.52°	98.82°	2420
Campamento Plan	19.45°	99.00°	2236
Lago de Texcoco	19.45°	98.90°	2235

ARSTAN presentó una sensibilidad de 0.23, lo cual indica la detección confiable de eventos de alta y baja frecuencia (Figura 2). De 1550 a 1590 prevalecieron condiciones climáticas que limitaron el crecimiento de la especie, situación similar ocurrió de 1620 a 1650, 1670 a 1690, 1740 a 1770, 1810 a 1850, 1880 a 1910, 1920 a 1930, 1960 a 1980 y 1995 a 2010. Las inundaciones históricas que afectaron la ciudad de México como las acontecidas en los años 1555, 1580, 1604, 1607, 1622, 1629, 1707, 1714, 1774, 1806, 1819, 1856, 1875, 1900, 1901 y 1910 (García-Acosta, 1993), no se reflejaron en mayor crecimiento en los árboles del parque El Contador. Los períodos favorables de incremento radial ocurrieron después de 1521 hasta 1550, 1567 a 1568, 1590 a 1620, 1650 a 1660, 1725 a 1740, 1780 a 1795, 1858 a 1875, 1935 a 1945 y 1985 a 1995.

Los eventos extremos de precipitación, que provocaron inundaciones en la ciudad de México, tuvieron una influencia positiva y derivaron en mayores valores de los índices para la cronología del PCHA: los años 1607 (1.42), 1629 (1.94), 1707 (1.24), 1806 (1.38), 1810 (1.34), 1819 (1.57), 1875 (1.39), 1900 (1.10) y 1910 (1.33). En ciertos eventos, este crecimiento se reflejó uno o dos años después de la inundación, como fue en los años 1902 (1.2849) y 1903 (1.26). Esto ocurre cuando en época de bajo

Programs Library of the University of Arizona (Fritts, 1991). The meteorological stations are listed in Table 1).

RESULTS AND DISCUSSION

Total ring series of PCO and ring width indices

The material that complied with the dendrochronological standards (Stokes and Smiley, 1968) was integrated with 17 sections of dead trees and 20 growth nuclei of live trees. The total ring series of the Montezuma cypress extended from 1521 to 2012 (492 years). The ring width series in ARSTAN presented a sensitivity of 0.23, which indicates the reliable detection of high and low frequency events (Figure 2). From 1550 to 1590 there was prevalence of climatic conditions that limited the growth of the species. A similar situation occurred from 1620 to 1650, 1670 to 1690, 1740 to 1770, 1810 to 1850, 1880 to 1910, 1920 to 1930, 1960 to 1980 and 1995 to 2010. The historic floods which affected Mexico City, such as those that occurred in the years 1555, 1580, 1604, 1607, 1622, 1629, 1707, 1714, 1774, 1806, 1819, 1856, 1875, 1900, 1901 and 1910 (García-Acosta, 1993) were not reflected in higher growth in the trees of the El Contador park. The favorable periods of radial increment occurred

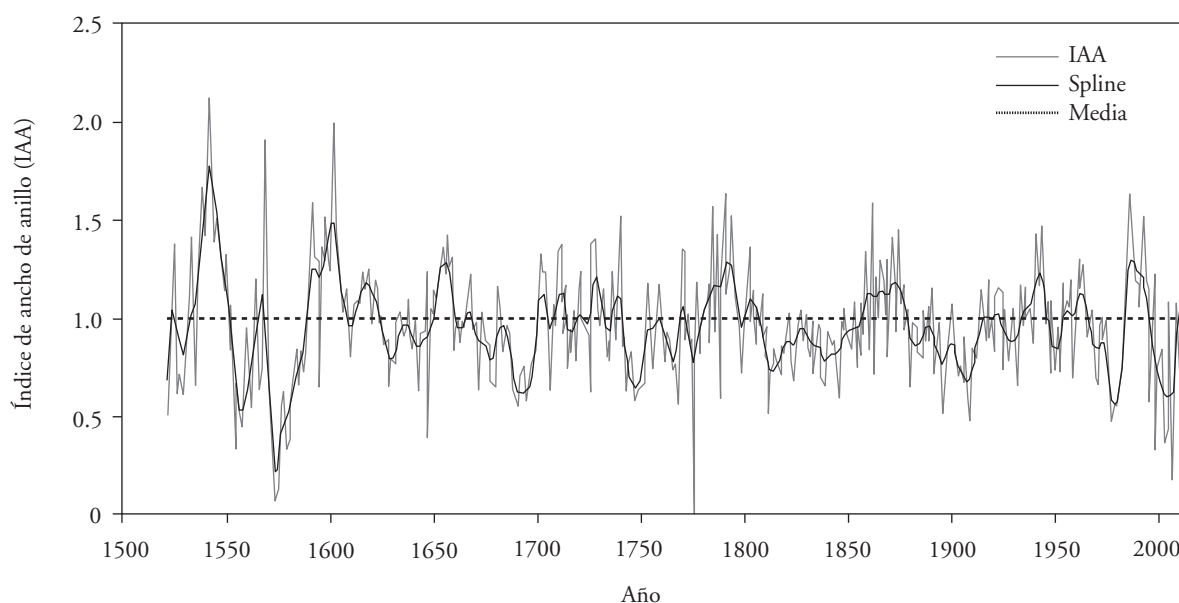


Figura 2. Cronología estándar de anillo total, período 1521-2012 para el Parque El Contador.
Figure 2. Standard chronology of total ring, period 1521-2012 for the El Contador park.

crecimiento los excesos de precipitación igualan la capacidad de retención de humedad del suelo, lo cual prolonga la disponibilidad hasta el siguiente ciclo de crecimiento.

Edad de las muestras recolectadas

Las secciones de árboles muertos mostraron diversas fechas del último anillo de crecimiento, esto se debe a que los árboles murieron en diferentes fechas. Los crecimientos más recientes corresponden a las décadas de 1950 y 1970 y sólo para un árbol se determinó que fue en 1984 (Cuadro 2).

La historia indica que los ahuehuetes del PCO fueron plantados durante el reinado de Nezahualcōyotl, después de 1420. En esa época los tenancas dominaban la región. Su rey Tezozómoc otorgó al príncipe Texcocano un permiso para vivir en uno de los palacios en Texcoco, donde continuó con su educación y entrenamiento militar, además de viajar entre Chapultepec y Texcoco (Martínez, 1996). Aunque ninguna muestra alcanza la fecha 1420, la remoción de madera del parque eliminó la posibilidad de encontrar muestras de esa edad.

after 1521 to 1550, 1567 to 1568, 1590 to 1620, 1650 to 1660, 1725 to 1740, 1780 to 1795, 1858 to 1875, 1935 to 1945 and 1985 to 1995.

The extreme rainfall events which provoked flooding in Mexico City had a positive influence and derived in higher values of the indices for the PCHA chronology: the years 1607 (1.42), 1629 (1.94), 1707 (1.24), 1806 (1.38), 1810 (1.34), 1819 (1.57), 1875 (1.39), 1900 (1.10) and 1910 (1.33). In certain events, this growth was reflected one or two years after the flood, as was for the years 1902 (1.2849) and 1903 (1.26). This occurs when in a low growth period the excesses of rainfall are equal to the moisture retention capacity of the soil, which prolongs the availability to the following growth cycle.

Age of the collected samples

The dead tree sections showed diverse dates of the final growth ring. This is because the trees died at different dates. The most recent growths corresponded to the decades of 1950 and 1970, and for only one tree, the date of 1984 was determined (Table 2).

Cuadro 2. Último año de crecimiento de secciones recolectadas de árboles muertos en el parque El Contador.

Table 2. Last year of growth of sections collected from dead trees in the El Contador park.

Clave de muestra	Latitud	Longitud	Primer crecimiento [†]	Último crecimiento [‡]	Observaciones
PCO06A	19.545	98.922	1734	1912	Sección de base de fuste
PCO07A	19.545	98.922	1500	1905	Sección de rama principal, bifurcada 5.8 m arriba de la base del fuste
PCO08A	19.545	98.922	1604	1966	Base del fuste
PCO09A	19.545	98.924	1676	1960	Base del fuste
PCO10A	19.545	98.923	1616	1954	Sección de rama principal
PCO11A	19.545	98.925	1730	1963	Sección de rama principal
PCO12A	19.545	98.925	1566	1952	Sección de fuste principal
PCO13A	19.545	98.925	1670	1959	Sección de fuste principal
PCO15A	19.545	98.925	1632	1947	Base del fuste
PCO16A	19.545	98.921	1750	1984	Muerto en pie
PCO19A	19.548	98.929	1630	1956	Fuste principal quemado
PCO22D	19.545	98.925	1617	1939	Sección de fuste principal
PCO24A	19.545	98.925	1598	1845	Sección de fuste principal
PCO25A	19.545	98.925	1698	1927	Sección de fuste principal
PCO26B	19.545	98.225	1691	1893	Sección de fuste principal
PCO27A	19.545	98.225	1602	1781	Sección de fuste principal

[†]El primer crecimiento indica el anillo más interno fechado, aunque no necesariamente corresponde al centro del árbol; mientras que los años en negrita se refieren al primer anillo en la sección transversal de la base de fustes principales ♦ [‡]First growth indicates the innermost ring dated, although it doesn't necessarily correspond to the tree center (pith); whereas the years in bold type refer to the first ring in the transversal section of the base of main trunks.

[‡]Último crecimiento o año en que murió el árbol ♦ Last growth or year in which the tree died.

Roldán (1931) estudió una sola sección y contabilizó 291 años (fecha de establecimiento del árbol aproximadamente en 1614). Sin embargo, tuvo dificultad en contabilizar los últimos 90 años por lo estrecho de los anillos. Aunque se deben considerar los errores de conteo de Roldán (1931), ese autor concluyó que existía alta probabilidad de que los ahuehuetes del PCO no hubieran sido plantados durante el reinado de Nezahualcóyotl.

El conteo de anillos es influenciado por el pulido de la muestra y la extracción de la resina con diluyente para resaltar con nitidez los crecimientos (Stokes y Smiley, 1968). Sin embargo, tales factores no pudieron influir en los resultados del presente estudio, dado que se realizaron los procedimientos adecuados para preparar las muestras, y el análisis y verificación del fechado fue corroborado con gráficos de crecimiento (Douglas, 1941) y estadísticamente con el programa de control y calidad del fechado COFECHA (Holmes, 1983). La intercorrelación de las series fue estadísticamente significativa ($p \leq 0.01$) con un valor de 0.39. El promedio de sensibilidad media fue 0.41 y la intensidad de la señal común en ARSTAN 0.90, considerando la muestra analizada. La altura a la que se obtiene la muestra en el fuste influye también en los anillos contabilizados; no obstante, el crecimiento inicial de ahuehuete puede ser de 0.5 m por año, de tal forma que en las trozas gruesas se pueden haber perdido 30 a 50 anillos. Esta pérdida aunada a la diferencia de los años contenidos en radios diferentes (ramas *vs.* fuste), dejó fuera la edad de principios del siglo XV para las muestras involucradas en el análisis.

Las secciones trasversales proceden de tocones remanentes y ramas de arbolado muerto, del fuste principal en la mayoría de los casos. A pesar de lo anterior, se dató una rama principal de un árbol cuyo anillo interno corresponde al año 1500. El tocón de este árbol presentaba pudriciones y no se pudo analizar. Sin embargo, por la altura a la que se obtuvo la sección (5.8 m) y la diferencia entre los diámetros de la base del fuste (251 cm) y de la rama (90 cm), se pudo estimar mediante el cálculo de incremento medio en diámetro la existencia de 80 anillos, los cuales confirman que este ejemplar se estableció durante el reinado de Nezahualcóyotl (Figura 3). A diferencia de la conclusión de Roldán (1931), este estudio aporta pruebas confiables de que los ejemplares son de la época del rey poeta, ya que en lugar de una sola rodaja se estudiaron 17 y se aportan las estadísticas

History indicates that the Montezuma cypresses of the PCO were planted during the reign of Nezahualcóyotl, after 1420. In this period the Tenanecas dominated the region. Their king Tezozómoc granted permission to the prince of Texcoco to live in one of the palaces in Texcoco, where he continued his military education and training, and traveled between Chapultepec and Texcoco (Martínez, 1996). Although none of the samples dates to 1420, the removal of wood from the park eliminated the possibility of finding samples of that age. Roldán (1931) studied a single section and counted 291 years (date of establishment of the tree approximately in 1614). However, he had difficulty in counting the last 90 years due to the narrowness of the rings. Although Roldán's counting errors (1931) should be considered, this author concluded that there was a high probability that the Montezuma cypresses of the PCO were not planted during the reign of Nezahualcóyotl.

Ring counting is influenced by the polishing of the sample and the extraction of the resin with a diluent to enhance the definition of the growth rings (Stokes and Smiley, 1968). However, these factors could not influence the results of the present study, given that adequate procedures were followed for preparing the samples, and the analysis and verification of the dating were confirmed with growth graphs (Douglas, 1941), and statistically verified with the dating control and quality program COFECHA (Holmes, 1983). The inter-correlation of the series was statistically significant ($p \leq 0.01$) with a value of 0.39. The average of mean sensitivity was 0.41 and the intensity of the common signal in ARSTAN 0.90, considering the sample analyzed. The trunk height at which the sample was obtained also influenced the ring count; however, the initial growth of Montezuma cypress can be 0.5 m per year, therefore in the thick sections 30 to 50 rings may have been lost. This loss added to the difference of the years contained in different radii (branches *vs.* trunk) left out the age of the early XV century for the samples involved in the analysis.

The transversal sections come from remnant stumps and branches from dead trees, mostly from the main trunk. Despite the above, a main branch of a tree was dated, whose internal ring (pith) corresponded to the year 1500. The stump of this tree presented rotting and was not possible to analyze

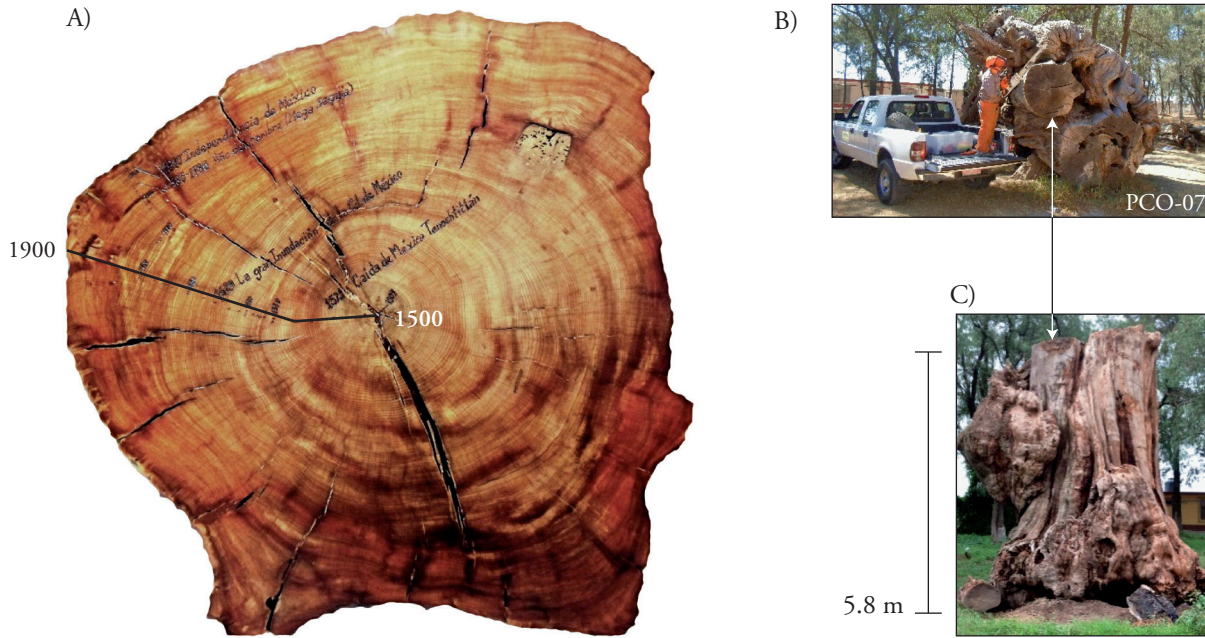


Figura 3. A) Sección transversal fechada cuyo anillo interno corresponde a 1500, B) proceso de toma de muestra en el arbolado, y C) altura a la que se tomó la muestra PCO-07.

Figure 3. A) Dated transversal section whose inner ring corresponds to 1500, B) sampling process in the stand, and C) height at which the sample PCO-07 was taken.

de calidad del fechado. Reportes históricos señalan la existencia de este jardín rodeado de ahuehuetes, por lo que con base en la información generada y en los trabajos de Meyer (1853), Vélez (1925) y Martínez (1963), se considera que la plantación de estos árboles, ocurrió durante el reinado de Nezahualcōyotl o incluso con anterioridad.

Las razones por las cuales desaparecieron los árboles pueden ser varias, pero mientras la especie tiene acceso al agua se encuentran sitios con árboles milenarios (Villanueva *et al.*, 2010). Por los estudios paralelos en el Ex Lago Texcoco (CONAGUA, 2007) dos factores importantes pudieron afectar la sobrevivencia del arbolado: 1) el incremento en la alcalinidad del agua del subsuelo (Durazo y Falvorden, 1989) y, 2) mayor profundidad en los niveles freáticos en años recientes (Escobar, 2010; Correa-Díaz *et al.*, 2014).

De forma natural, en todos los árboles la causa de disminución en crecimiento radial se debe a que el radio de los anillos de crecimiento es cada vez más grande, y como la masa neta del crecimiento del árbol depende de una sección transversal de crecimiento activa, con el tiempo se forman anillos de crecimiento concéntricos de menor radio (Fritts, 1976).

it. However, due to the height from which the section was obtained (5.8 m) and the difference between the diameters of the base of the trunk (251 cm) and the branch (90 cm), it was possible to estimate using the calculation of mean diameter increment the existence of 80 rings, which confirm that this specimen was established during the reign of Nezahualcōyotl (Figure 3). Contrary to the conclusion of Roldán (1931), this study provided reliable proof that the specimens are from the period of the poet king, given that instead of a single slice, 17 were studied and the statistics of the quality of the dating are provided. Historic reports indicate the existence of this garden surrounded by Montezuma cypresses, thus based on the information generated and the works of Meyer (1853), Vélez (1925) and Martínez (1963), it is considered that the plantation of these trees occurred during the reign of Nezahualcōyotl or even earlier.

The reasons for which the trees disappeared can be several, but as long as the species has access to water, sites with millenary trees are found (Villanueva *et al.*, 2010). From the parallel studies in the Ex Lake of Texcoco (CONAGUA, 2007), two important factors could have affected the survival of the stand:

Correlación entre la serie dendrocronológica y la precipitación

La serie dendrocronológica se correlacionó significativamente con la precipitación estacional de enero a junio para el período 1961 a 2003 ($r=0.48$, $n=43$, $p\leq 0.001$). Resultados similares fueron reportados por Cortés *et al.* (2010). Esta correlación se incrementó de 1984 a 2003 ($r=0.738$, $n=20$, $p\leq 0.0002$) (Figura 4). Los anillos de ahuehuete explicaron 55 % de la precipitación enero-junio confirmando su alto potencial para reconstruir el historial de precipitación del Valle de México en los últimos 500 años.

Comparación de la serie PCO con otras cronologías

La correlación entre la serie PCO y las de PCHA y AMQ no fue significativa, a pesar de estar separados 30 km y 141 km, respectivamente. En el PCHA sólo en dos de 18 periodos de 25 años, se encontraron correlaciones negativas altas antes de 1635 ($r=-0.56$ a -0.66 , $p\leq 0.003$) y bajas pero negativas

1) the increment in alkalinity of the subsoil water (Durazo and Falvorden, 1989) and 2) greater depth in the groundwater levels in recent years (Escobar, 2010; Correa-Díaz *et al.*, 2014).

Naturally, in all trees the cause of decrease in radial growth is due to the fact that the radius of the growth rings is increasingly greater, and as the net mass of tree growth depends on an active transversal growth section, in time concentric growth rings of smaller radius are formed (Fritts, 1976).

Correlation between the dendrochronological series and rainfall

The dendrochronological series was significantly correlated with the seasonal rainfall of January to June for the period 1961-2003 ($r=0.48$, $n=43$, $p\leq 0.001$). Similar results were reported by Cortés *et al.* (2010). This correlation increased from 1984 to 2003 ($r=0.738$, $n=20$, $p\leq 0.0002$) (Figure 4). The Montezuma cypress rings explained 55 % of the January-June rainfall, confirming their high potential for reconstructing the history of rainfall in the Valley of Mexico in the last 500 years.

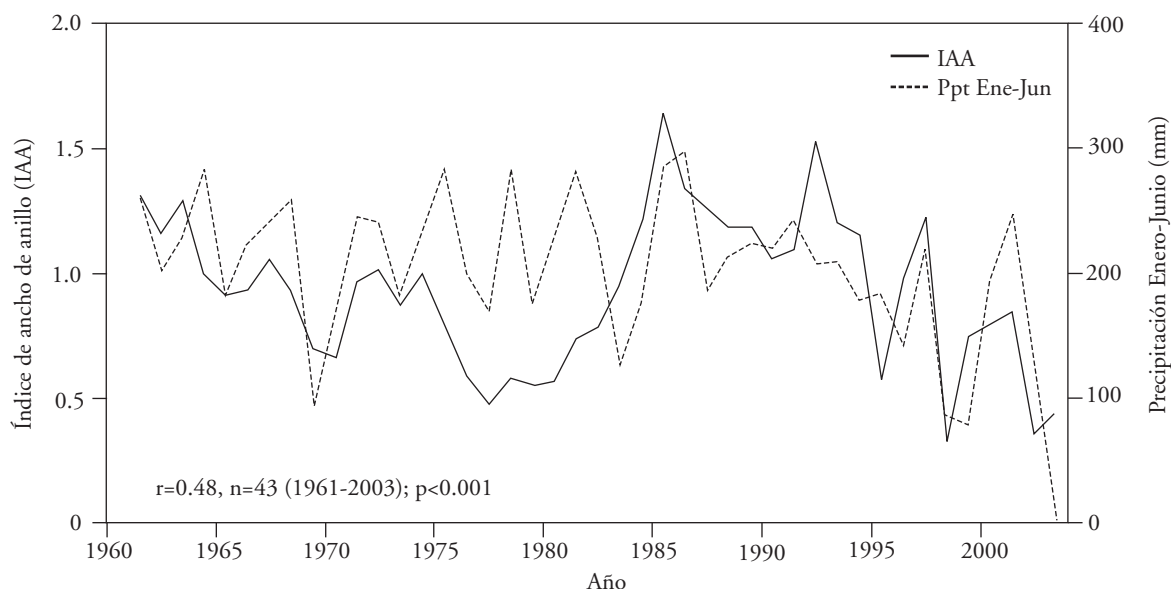


Figura 4. Relación entre el índice de ancho de anillo de la cronología de ahuehuete en el PCO y la precipitación estacional acumulada del período enero-junio.

Figure 4. Relationship between the ring width index of the Montezuma cypress chronology in the PCO and accumulated seasonal rainfall of the period January-June.

en los últimos 200 años (Figura 5). Este resultado podría explicarse por un manejo diferente para ambas poblaciones. En el PCO, los árboles dependían más de la variación en las condiciones climáticas y en el nivel del manto freático del acuífero (Durazo y Farvolden, 1989); en el PCHA, el arbolado ha estado sujeto al suministro complementario de agua a pesar del abatimiento del nivel freático en décadas recientes (Villanueva *et al.*, 2003).

A diferencia del PCO, en el PCHA los eventos extremos de precipitación, que provocaron inundaciones en la ciudad de México, tuvieron una influencia positiva y derivaron en mayores valores de los índices en los años 1607 (1.42), 1629 (1.94), 1707 (1.24), 1806 (1.38), 1810 (1.34), 1819 (1.57), 1875 (1.39), y 1910 (1.33). En ciertos eventos este crecimiento tuvo un retardo de un año, como en 1902 (1.29) y 1903 (1.26). Aunque el ahuehuete puede soportar períodos de sequía prolongados (Martínez, 1963), demanda un volumen constante de agua durante su estación de crecimiento (Villanueva *et al.*, 2013).

Comparison of the PCO series with other chronologies

The correlation among the PCO series and those of PCHA and AMQ was not significant, even though they are separated by 30 km and 141 km, respectively. In the PCHA, only in two of 18 periods of 25 years, high negative correlations were found prior to 1635 ($r = -0.56$ to -0.66 , $p \leq 0.003$) and low but negative in the last 200 years (Figure 5). This result could be explained by a different management for the two populations. In the PCO, the trees depended more on the variation of the climatic conditions and on the ground water level of the aquifer (Durazo and Farvolden, 1989); in the PCHA, the stand has been subjected to the complementary application of water, despite the depletion of the groundwater level in recent decades (Villanueva *et al.*, 2003).

In contrast to the PCO, in the PCHA the extreme rainfall events which provoked flooding in Mexico City had a positive influence and derived in higher

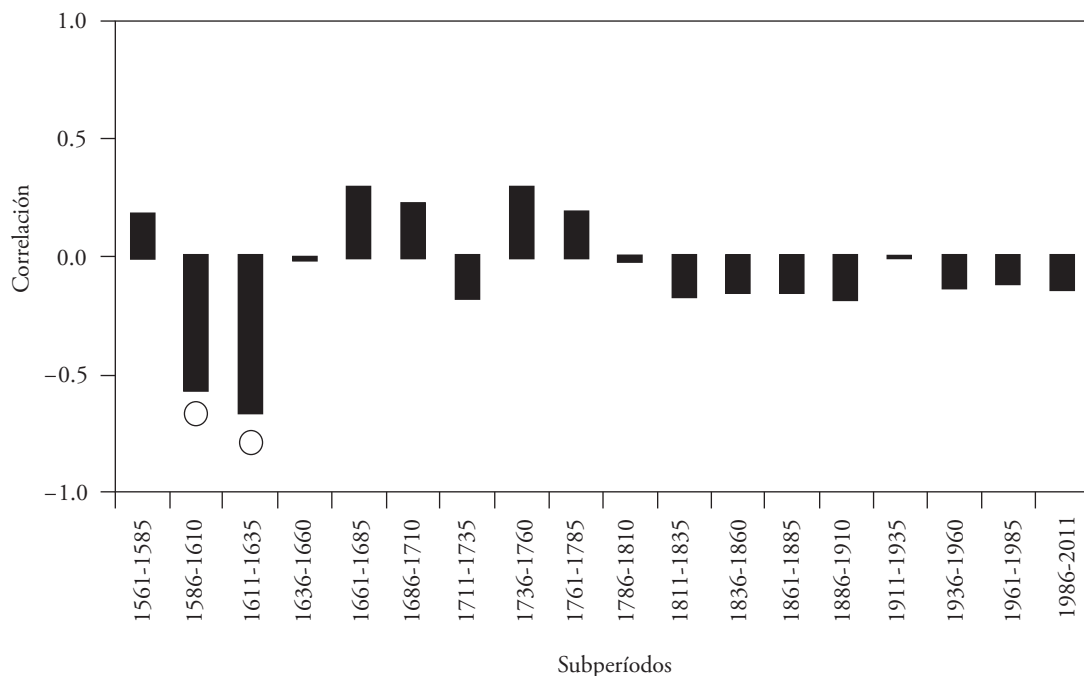


Figura 5. Asociación entre los índices dendrocronológicos de las cronologías del Parque El Contador y el Parque de Chapultepec, en subperíodos de 25 años. ○ correlación significativa ($p \leq 0.05$).

Figure 5. Association between the dendrochronological indices of the chronologies of the El Contador park and Chapultepec park, in subperiods of 25 years. ○ Significant correlation ($p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

La recuperación de información dendrocronológica de arbolado longevo permitió la reconstrucción de la precipitación invierno-primavera en el Valle de México y precisar la edad de los ahuehuetes del Parque El Contador. Debido a que la información de las estaciones meteorológicas de México abarca las últimas cinco décadas, el estudio científico de arbolado longevo permite la reconstrucción del crecimiento arbóreo y variables del clima en un periodo histórico hasta diez veces mayor que el lapso referido.

La aplicación de técnicas dendrocronológicas es válida para el Valle de México y permite detectar cambios recientes en la variabilidad climática. La intensidad del impacto del hombre en los recursos naturales del centro de México se refleja en los ritmos de crecimiento de los ahuehuetes.

Aunque los datos encontrados no son suficientes para constituir una prueba de cambio climático, llama la atención que en las últimas tres décadas no se haya reestablecido la precipitación promedio de 225 mm que se presentaba antes de 1985.

La serie dendrocronológica desarrollada para el parque El Contador es un avance importante en el entendimiento de la influencia del clima en el desarrollo radial del ahuehuete. Esta información es relevante para la conservación de esta especie en su ambiente natural o en plantaciones inducidas con propósitos estéticos, farmacéuticos o de restauración.

AGRADECIMIENTOS

Al Ejido de San Salvador Atenco, Municipio de Atenco, por el permiso de recolecta y apoyo logístico del muestreo. Al programa UC-Mexus (proyecto CN-13-546) y al Colegio de Postgraduados, mediante la línea Prioritaria de Investigación ocho, Impacto y Mitigación del Cambio Climático.

LITERATURA CITADA

- Brienen, R. J. W., G. Helle., T. L. Pons, G. Jean-Loup, and M. Gloor. 2012. Oxygen isotopes in tree rings are a good proxy for Amazon precipitation and El Niño-Southern oscillation variability. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA* 109: 16957–16962.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2007. Apoyo técnico para la actualización de la disponibilidad del acuífero de Texcoco. Consejo de Cuenca Valle de México.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bull.* 47: 37-59.

values in the indices of the years 1607 (1.42), 1629 (1.94), 1707 (1.24), 1806 (1.38), 1810 (1.34), 1819 (1.57), 1875 (1.39), and 1910 (1.33). In certain events, this growth had a delay of one year, as it in 1902 (1.29) and 1903 (1.26). Although the Montezuma cypress can withstand prolonged periods of drought (Martínez, 1963), it demands a constant volume of water during its growth season (Villanueva *et al.*, 2013).

CONCLUSIONS

The recovery of dendrochronological information of long-living trees permitted the reconstruction of the winter-spring rainfall in the Valley of Mexico and pinpoint the age of the Montezuma cypress trees of the El Contador park. Because the information of the Mexican meteorological stations covers the last five decades, the scientific study of long-living trees permits the reconstruction of tree growth and climatic variables in a historic period up to ten times longer than the abovementioned time lapse.

The application of dendrochronological techniques is valid for the Valley of Mexico and makes it possible to detect recent changes in climatic variability. The intensity of the impact of humans on the natural resources of central Mexico is reflected in the growth rates of the Montezuma cypress.

Although the data found is insufficient to construct proof of climatic change, it calls attention to the fact that in the past three decades, the average rainfall of 225 mm prior to 1985 has not been re-established.

The dendrochronological series developed for the El Contador park is an important advancement for understanding the influence of climate on the radial growth of the Montezuma cypress. This information is relevant for the conservation of this species in its natural habitat or in plantations induced for aesthetic, pharmaceutical or restoration purposes.

—End of the English version—



- Correa-Díaz, A., A. Gómez-Guerrero, J. Villanueva-Díaz, L. U. Castruita-Esparza, T. Martínez-Trinidad y R. Cervantes-Martínez. 2014. Análisis dendroclimático de ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el centro de México. *Agrociencia* 48:537-551.

- Cortés-Arroyo, A. R., A. M. Domínguez-Ramírez, M. Gómez-Hernández, J. R. Medina-López, M. Hurtado, Y. de la Peña, and F. J. López-Muñoz. 2011. Antispasmodic and bronchodilator activities of *Taxodium mucronatum* Ten. leaf extract. *Afr. J. Biotechnol* 10: 54-64.
- Cortés B., E., J. Villanueva D., J. Estrada A., C. Nieto de Pascual P., V. Guerra C., y O. Vázquez C. 2010. Utilización de *Taxodium mucronatum* Ten. para determinar la variación estacional de la precipitación en Guanajuato. *Rev. Cien. For. Méx.* 1: 113-120.
- De Alva Ixtlixóchitl, F. 1891. Obras Históricas. II. Relaciones. México, D.F.
- De Motolinia, T. 2008. Historia de los Indios de la Nueva España: Escrita a Medios del Siglo XVI. Edición digital. Universidad de Texas. 282 p.
- Dong-qin, Z., M. Hai-bo, L. Zhi-guo, Y. Chao-guang, X. He-bao, and Y. Yun-long. Genetic diversity analysis of superior individuals of *Taxodium mucronatum* base don SRAP marker. 2012. *J. Plant Resour. Environ.* 21: 36-41.
- Douglas, A. E. 1941. Crossdating in dendrochronology. *J. For.* 39: 825-828.
- Durazo, J., and R. N. Farvolden. 1989. The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. *J. Hydrol.* 112: 171-190.
- Escobar V., B. S. 2010. Análisis de la sobre-explotación del acuífero de Texcoco. Tesis de Doctorado, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 138 p.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press. New York, NY, USA. 567 p.
- Fritts, H. C. 1991. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data. The University of Arizona Press, Tucson. 286 p.
- García-Acosta, V. 1993. Las sequías históricas de México. *Desastres y Soc.* 1(1): 1-18.
- Heyden, D. 2002. Jardines botánicos prehispánicos. *Arqueol. Mex.* X: 18-23.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.* 43: 69-78.
- Jáuregui, E. 2002. The climate of the Mexico City air basin: Its effects on the formation and transport of pollutants. In: Fenn, M. E., M. L. I. De Bauer, T. Hernandez-Tejeda (eds). *Urban Air Pollution and Forests. Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Ecological Studies Series*, vol. 156. Springer-Verlag, New York, pp: 86-117.
- Leavitt, S. W. 2010. Tree-ring C-H-O isotope variability and sampling. *Sci. Total Environ.* 408: 5244-5253.
- Luján-Hidalgo, M. C., F. A. Gutiérrez-Miceli, L. M. C. Ventura-Canseco, L. Dendooven, M. R. Mendoza-López, S. Cruz-Sánchez, O. García-Barradas, y M. Abud-Archila. 2012. Composición química y actividad antimicrobiana de los aceites esenciales de hojas de *Bursera graveolens* y *Taxodium mucronatum* de Chiapas, México. *Gayana Bot.* 69 :7-14.
- Martínez, M. 1963. *Las Pináceas Mexicanas*. 3a. ed. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 400 p.
- Martínez, J. L. 1996. *Nezahualcōyotl: Vida y Obra*. Fondo de Cultura Económica. México, D. F. 334 p.
- McCarroll, D., and N. J. Loader. 2004. Stable isotopes in tree rings. *Quat. Sci. Rev.* 23: 771-801.
- Mérian, P., J. C. Pierrat, and F. Lebourgeois. 2013. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* 31: 58-67.
- Meyer, B. 1853. *Mexico Aztec Spanish and Republic*. Vol. II. University of California at Los Angeles. Hartford: S. Drake and Company. Los Angeles. 398 p.
- Robinson, W. J., and R. Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bull.* 40: 59-64.
- Roldán, A. 1931. La edad de los ahuehuetes del Parque El Contador. *Rev. Méx. For.* IX: 16-18.
- Stahle, D. W., E. R. Cook, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell, D. M. Meko, H. D. Grissino-Mayer, E. Watson, and B. H. Luckman. 2000. Tree-ring data document 16th century megadrought over North América. *Eos, Trans., Am. Geophys. Union* 81: 121-125.
- Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva D., R. R. Heim Jr., F. K. Fye, J. Cerano P., R. Acuna S., and M. K. Cleaveland. 2011. Pacific and Atlantic influences in Mesoamerican over the past millennium. *Climate Dynamics* DOI 10.1007/s00382-011-1205-z.
- Stokes, M. A., and T. L. Smiley. 1968. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Chicago Press. Chicago. 73 p.
- Vélez, D. M. 1925. El Bosque del "Contador". *Rev. Méx. For.* III: 93-96.
- Villanueva D., J., D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, F. Camacho M., P. Nuñez D. F., S. Gómez C., J. Sánchez S., y J. A. Ramírez G. 2003. Registros climáticos de los ahuehuetes de Chapultepec en los últimos 450 años. *Boletín del Archivo Histórico del Agua* 8: 34-42.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D.W. Stahle, V. Constante G., L. Vázquez S., J. Estrada A., y J. D. Benavides S. 2010. Árboles longevidos de México. *Ensayo. Rev. Cien. For. Méx.* 1: 7-30.
- Villanueva D., J., V. Constante G., J. Cerano P., A. R. Martínez S., D. W. Stahle, y J. Estrada A. 2013. Fenología y crecimiento radial del sabino (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el río San Pedro Mezquital, Durango. *Folleto Técnico* 27. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango México. 33 p.