

Volúmenes reconstruidos en presas del Valle del Yaqui con anillos anuales de coníferas*

Reconstructed volumes in dams of the Valle del Yaqui with annual rings of conifers

José Villanueva Díaz^{1§}, Julián Cerano Paredes¹, Armando Gómez Guerrero², Luis Ubaldo Castruita Esparza², David W. Stahle³ y José Ariel Ruiz Corral⁴

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación a Agua, Suelo, Planta y Atmósfera CENID-RASPA, INIFAP. Margen Derecha Canal de Sacramento km 6.5, Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, México. Tel: 871 159 0104, 159 0105, 159 0107. (villanueva.jose@inifap.gob.mx). ²Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados, Carr. Mexico-Texcoco km 36.5, Montecillo-Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, México. (agomezg@colpos.mx). ³Tree-Ring Laboratory, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas. (dstahle@uark.edu). ⁴Campo Experimental "Altos de Jalisco", Tepatitlán, Jalisco. (ruiz.ariel@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: villanueva.jose@inifap.gob.mx.

Resumen

Una red dendrocronológica de madera temprana, tardía y anillo total de *Pseudotsuga menziesii* se desarrolló para la cuenca alta del Río Yaqui (CRY), para explicar los volúmenes históricos de escurrimiento registrados en la cuenca y subcuencas que alimentan tres de las más grandes presas (Angostura, Novillo, Oviachic) en el estado de Sonora, que irrigan anualmente cerca de 250 000 ha. Las cronologías mostraron una variabilidad climática interanual y multianual similar ($r > 0.60, p < 0.01$), lo que sugiere la influencia de fenómenos climáticos comunes; situación que permitió integrarlas en una cronología regional de 479 años (1534-2012) de extensión. La cronología regional de madera temprana respondió a la precipitación acumulada febrero-mayo y a los volúmenes de escurrimiento octubre-junio, que representan 43% de los registrados anualmente en la CRY. Ambas variables estuvieron correlacionadas ($r = 0.83, p < 0.01, n = 479$), sugiriendo que el escurrimiento anual tiene alta influencia de la precipitación invierno-primavera. A nivel subcuenca, las series dendrocronológicas mostraron una asociación significativa con los volúmenes registrados en las presas respectivas, pero el número limitado de series previno un análisis más completo de la variabilidad hidroclimática, por lo que es importante su expansión. ENSO fue el fenómeno climático que más impactó la variabilidad en la precipitación y

Abstract

A dendrochronological network of early and late-wood and full ring of *Pseudotsuga menziesii* was developed for the upper basin of the Yaqui river (CRY) to explain the historical runoff volumes recorded in the basin and sub-basins feeding three of the largest dams (Angostura, Novillo, Oviachic) in the State of Sonora, which supply water annually for about 250 000 ha. The chronologies showed an inter-annual and multi-annual climate variability ($r > 0.60, p < 0.01$), suggesting the influence of common weather phenomena; situation that allowed them within a regional chronology of 479 years (1534-2012) in length. The regional chronology of earlywood responded to the accumulated rainfall from February to May and runoff volumes from October to June, representing 43% of the annually registered in the CRY. Both variables were correlated ($r = 0.83, p < 0.01, n = 479$), suggesting that the annual runoff has high influence of the winter-spring precipitation. At sub-basin level, the dendrochronological series showed a significant association with the volumes recorded in the respective dams, but the limited number of series prevented a more complete analysis of the hydroclimatic variability, so it is important to expand it. ENSO was the phenomenon that affected the most the variability in rainfall and runoff of the winter-spring period.

* Recibido: mayo de 2014
Aceptado: octubre de 2014

escurrimientos del período invierno-primavera. La asociación entre la cronología regional de madera temprana y los índices de Oscilación del Sur (SOI) fue negativa, pero significativa en la época invernal ($r = -0.59$, $p < 0.01$), lo que implica alta influencia de la fase cálida de este fenómeno en la variabilidad climática interanual.

Palabras clave: *Pseudotsuga menziesii*, dendrocronología, ENSO, escurrimientos.

Introducción

El incremento en la demanda de recursos hídricos en el noroeste de México, requiere de un conocimiento más detallado de las variaciones climáticas de alta y baja frecuencia que ocurren directamente en los sitios de captación de agua, como es el caso de la Sierra Madre Occidental (SMO), donde se generan los escurrimientos que drenan hacia los grandes reservorios ubicados en la parte baja de la Cuenca del Río Yaqui (CRY) y que posteriormente son utilizados para riego superficial. El conocer con detalle las fluctuaciones hidroclimática y sus tendencias, permitirá fundamentar acciones de manejo integral de agua que consideren este comportamiento y permitan planear la liberación de los volúmenes de agua, acorde a esta variabilidad.

El objetivo de este estudio fue desarrollar una red dendrocronológica de madera temprana, tardía y de anillo total de especímenes de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) en la parte alta de la CRY y relacionarla con datos climáticos y escurrimientos registrados en la cuenca y con los volúmenes de agua generados a nivel subcuenca y captados en las diferentes presas; esta información es de relevancia científica para modelar tendencias de la variabilidad hidroclimática en esta cuenca y fundamentar acciones que permitan la conservación de los sitios de producción de agua y planear un manejo sustentable del recurso hídrico con base a la frecuencia de eventos extremos.

Descripción del área de estudio

La cuenca del río Yaquí se sitúa en el sur del estado de Sonora en las coordenadas geográficas 27°00' a 27°40' de latitud norte y 109°40' a 110°25' de longitud oeste. Geológicamente está compuesta por roca sedimentaria, ígnea intrusiva y extrusiva, metamórfica y vulcano-sedimentaria; posee una diversidad de climas dominando los secos, semi secos

The association between regional chronology of early-wood and the Southern Oscillation Index (SOI) was negative, but significant in the winter ($r = -0.59$, $p < 0.01$), implying high influence of the warm phase of this phenomenon in the natural climate variability.

Keywords: *Pseudotsuga menziesii*, dendrochronology, ENSO, runoff.

Introduction

The increase on the demand for water resources in northwestern Mexico, requires a more detailed knowledge of the climatic variations of high and low frequencies that occur directly at the sites of water uptake, such as the Sierra Madre Occidental (SMO), where the runoffs are generated, draining into the major reservoirs located in the lower part of the Yaqui river Basin (CRY), subsequently used for surface irrigation. Knowing in detail the hydroclimatic fluctuations and trends, will allow to substantiate actions of integral management of water considering this behaviour and allow planning the release of the volumes of water, according to this variability.

The aim of this study was to develop a dendrochronological network of earlywood, latewood and full ring specimens of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) in the upper CRY and relate it with climate and runoff data recorded in the basin and with the water volumes generated at sub-basin level and captured in the different dams; this information is of scientific relevance to model trends of hydroclimatic variability in this basin and justify actions for the conservation of water production sites for planning a sustainable management of water resources based on the frequency of extreme events.

Description of the study area

The Yaqui river basin is located in the southern State of Sonora at the geographical coordinates 27° 00' to 27° 40' north latitude and 109° 40' to 110° 25' west longitude. Geologically composed of sedimentary rock, intrusive and extrusive igneous, metamorphic and volcano-sedimentary; with a diversity of climates dominated by dry, semi-dry and humid. The average annual precipitation is 518 mm, which is presented in its highest proportion in summer (July to September); while the average annual temperature is 19 °C (CONAGUA, 2008).

y subhúmedo. La precipitación promedio anual es de 518 mm, la cual se presenta en su mayor proporción durante el verano (julio a septiembre); mientras que la temperatura media anual es de 19 °C (CONAGUA, 2008).

La CRY cubre una superficie estimada de 72 000 a 79 172 km², de la cual; 74% se ubica en Sonora, 21% en Chihuahua y 5% en Arizona, EUA. Los tributarios del río Yaqui son los ríos Bavispe y el Moctezuma-Nacozari en Sonora; Papigochi, Sirupa y Aros en Chihuahua, Leslie y Whitewater en EUA (Lutz y Curl, 2014). En el río Yaqui se encuentran construidas tres de las más grandes presas en el noroeste de México, denominadas "La Angostura" (Lázaro Cárdenas), construida en 1941 y localizada en el río Bavispe, "El Novillo" (Plutarco Elías Calles) situada en la confluencia de los ríos Yaqui y Moctezuma, construida en 1965 y "El Oviachi" (Álvaro Obregón) ubicada en la parte baja de la cuenca, cerca de Cd. Obregón, Sonora construida en 1952. La superficie de las subcuencas que alimentan estas presas es de 19 292, 40 368 y 11 792 km², con una capacidad de almacenamiento de 921, 3 020 y 3 227 (10⁶ m³), respectivamente (CONAGUA, 2008).

La descarga media anual de la cuenca se estima en cerca de 3 000 * 10⁶ m³, que alimentan dos grandes distritos de riego conocidos como "Valle del Yaqui" y "Colonia Yaquis", donde se encuentra asentada una población que en ambos lados de la frontera supera 1.2 millones de personas. Un 82% de los escurrimientos, se producen en la parte alta de la cuenca del Yaqui, en la provincia hidrogeológica de la SMO; particularmente en ecosistemas con la presencia de vegetación de bosque mixto, volúmenes que son conducidos a través de afluentes que se originan tanto en los estados de Sonora como de Chihuahua (Vega-Granillo *et al.*, 2011).

Materiales y métodos

Núcleos de crecimiento y secciones transversales de individuos seleccionados de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) y de *Pinus arizonica*, se colectaron en bosques mixtos de coníferas en la sección sureste de la CRY en el estado de Chihuahua. Los sitios de colecta se distribuyeron en la parte oriental, subcuenca presa El Novillo en el estado de Chihuahua, estos fueron "Tutuaca", dentro del área de conservación Cebadillas-Tutuaca, "Cebadillas de Ocampo", "Bisaloachi", "Madera" en el ejido "El Largo y Anexos", "Bocoyna" y "Basagochi", sólo el sitio "Bacadehuachi" se ubicó en el extremo norte de la CRY en el estado de Sonora.

The CRY covers an estimated area of 72 000-79 172 km² of which; 74% is located in Sonora, 21% in Chihuahua and 5% in Arizona, USA. The tributaries of the Yaqui river are the Bavispe and Moctezuma-Nacozari rivers in Sonora; Papigochic, Sirupa and Aros in Chihuahua, Leslie and Whitewater in the USA (Lutz and Curl, 2014). In the Yaqui river there are three of the largest dams in northwestern Mexico, called "La Angostura" (Lázaro Cárdenas), built in 1941 and located in the river Bavispe, "El Novillo" (Plutarco Elías Calles) located in the confluence of the rivers Yaqui and Moctezuma, built in 1965 and "The Oviachi" (Álvaro Obregón) located in the lower part of the basin, near Cd. Obregón, Sonora built in 1952. The surface of the sub-basins fed these dams is 19 292, 40 368 and 11 792 km², with a storage capacity of 921, 3 020 and 3 227 (10⁶ m³), respectively (CONAGUA, 2008).

The mean annual discharge of the basin is estimated at about 3 000 * 10⁶ m³, which feeds two large irrigation districts known as "Valle del Yaqui" and "Colonia Yaquis" where a population is settled in both sides of the border is over 1.2 million people. 82% of the runoffs, occur in the upper part of the Yaqui basin in the province of hydrogeological SMO; particularly in ecosystems with the presence of mixed forest vegetation, volumes that are conducted through tributaries that originate in the States of Sonora and Chihuahua (Vega-Granillo *et al.*, 2011).

Materials and methods

Cores growth and cross sections of selected individuals from Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and *Pinus arizonica* were collected in mixed conifer forests in the southeastern section of the CRY in the State of Chihuahua. The collection sites were distributed in the eastern sub-basin El Novillo in the State of Chihuahua, these were "Tutuaca" within the conservation area Cebadillas-Tutuaca, Cebadillas de Ocampo, Bisaloachi, "Madera" in communal land "El Largo y Anexos", "Bocoyna" and "Basagochi" only the place "Bacadehuachi" was at the north end of the CRY in the State of Sonora.

At each site, ancient trees were selected and radial increments were obtained with a Pressler drill. In addition, cross sections of dead trees were collected to facilitate and achieve extending dendrochronological date time series. The samples were dated by conventional

En cada sitio, se seleccionaron árboles longevos y se obtuvieron incrementos radiales con un taladro de Pressler. Adicionalmente, se colectaron secciones trasversales de árboles muertos para facilitar el fechado y lograr extender las series dendrocronológicas en el tiempo. Las muestras se fecharon mediante técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968; Fritts, 1976). Cada crecimiento individual, se dividió en bandas de crecimiento de madera temprana, tardía y anillo total (EW, LW y RW, por sus siglas en inglés), se midieron con un sistema convencional de medición VELMEX. El fechado y exactitud de la medición de cada anillo, se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las tendencias biológicas no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN (Cook, 1987), mediante el proceso de estandarización. Con ello, se genera un Índice de Ancho de Anillo (RWI, por sus siglas en inglés), otro de madera temprana (EWI) y madera tardía LWI, por sus siglas en inglés.

La asociación entre series dendrocronológicas desarrolladas tanto dentro de la CRY, como fuera de la misma, se analizó mediante correlaciones simples y componentes principales para determinar, aquellas con una respuesta climática común e integrar una cronología representativa de la cuenca con fines de comparación con variables climáticas e hidrométricas.

Las cronologías también se compararon con volúmenes de escurrimiento registrados en cada una de las presas y con el escurrimiento total registrado por los escurrimientos de los ríos que descargan en la CRY. Debido a la anomalía de los datos hidrométricos, estos se normalizaron al transformarlos a valores logarítmicos, cuadráticos, raíz cuadrada y valor inverso, luego se compararon contra los índices dendrocronológicos para determinar la mejor asociación con fines de explicar las fluctuaciones de alta y baja frecuencia que caracterizan la disponibilidad de los recursos hídricos en esta zona.

Los índices anuales de las series dendrocronológicas individuales y la regional representativa de la CRY, se compararon contra los índices ENSO para definir el impacto de este patrón circulatorio, el cual explica gran parte de la variabilidad hidroclimática invierno-primavera observada a nivel regional (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Nicholas y Battisti, 2008; Villanueva *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2012). La asociación con estos fenómenos circulatorios, se realizó al contrastar tanto los índices dendrocronológicos individuales como el regional con índices registrados del Niño Oscilación del Sur (SOI) (Allan *et al.*, 1996), índices SOI

dendrochronological techniques (Stokes and Smiley, 1968; Fritts, 1976). Each individual growth was divided into bands of earlywood, latewood and full ring growth (EW, LW and RW) measured with a conventional measurement system VELMEX. The co-dated and accuracy of measurement of each ring was verified with the program COFECHA (Holmes, 1983). Biological trends unrelated to climate were removed using the ARSTAN program (Cook, 1987), through the standardization process. Generating a ring width index (RWI), another of earlywood (EWI) and latewood (LWI).

The association between dendrochronological series developed both within the CRY, and outside of it was analysed by simple and main components correlations to determine those with a common climate response and integrate a representative chronology of the basin for comparison with climatic variables and hydrometric.

Timelines also compared with runoff volumes recorded in each of the dams and the total runoff recorded by runoff from rivers that discharge into the CRY. Considering the abnormality of the hydrometric data, these were normalized to transform them into logarithmic, quadratic, square root and reciprocal values, then compared against the dendrochronologic indices to determine the best association in explaining fluctuation of high and low frequency, characterize by the availability of water resources in this area.

Annual rates of individual dendrochronological series and regional representative of the CRY, compared with ENSO indices to define the impact of this circulation pattern, which explains much of the winter-spring hydroclimatic variability observed at the regional level (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Nicholas and Battisti, 2008; Villanueva *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2012). The association with these circulatory phenomena was conducted to compare both the individual and the regional dendrochronological indices registered with the Southern Oscillation (SOI) indices (Allan *et al.*, 1996), reconstructed SOI indices for northern Mexico (Stahle *et al.*, 1998), and tropical rain index (TRI), which is an estimate of the variability of ENSO (Wright, 1970).

The dendroclimatic reconstructions developed were verified as far as possible with previous reconstructions and historical documents related to the production of

reconstruidos para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998), e índice de lluvia tropical (TRI, por sus siglas en inglés), que constituye un estimativo de la variabilidad de ENSO (Wright, 1970).

Las reconstrucciones dendroclimáticas desarrolladas se verificaron en la medida de lo posible con reconstrucciones previas y con documentos históricos relacionados con la producción de alimentos y de otros impactos sociales y económicos descritos para la región (McCullough, 2005; Endfield y Fernández, 2006).

Resultados

Red dendrocronológica

La red dendrocronológica se integró por siete sitios de muestreo de Douglas-fir en zonas de captación de agua en parte de la CRY en el estado de Chihuahua. Dos cronologías adicionales, una de Douglas-fir (Sierra de los Ajos) y otra de *Pinus arizonica* (Bacadehuachi) para la parte norte de la CVY en el estado de Sonora y tres cronologías adicionales en la parte sur de Chihuahua (Cuadro 1).

food and other social and economic impacts described for the region (McCullough, 2005; Endfield and Fernández, 2006).

Results

Dendrochronological network

The dendrochronological network was confirmed by seven sampling sites of Douglas-fir, in water capture in part of the CRY in the State of Chihuahua. Two additional chronologies of Douglas-fir (Sierra de los Ajos) and a *Pinus arizonica* (Bacadehuachi) for the northern part of the CVY in Sonora and three additional chronologies in the southern part of Chihuahua (Table 1).

Six of the chronologies (TUT, BIS, CDO, MAD, CAC, ENA) were located in the central portion of the sub-basin that drains into the dam "El Novillo" and one more (MDG) at the north end of the same sub-basin (Figure 1). When considering as reference the dendrochronological series of full ring of Tutuaca, it was determined that there is a correlation exceeding 0.60 ($p < 0.001$) for most of the series located within the same watershed.

Cuadro 1. Sitios de colecta, coordenadas geográficas y extensión de las cronologías generada en la CRY en los estados de Chihuahua, Sonora y fuera de la cuenca con fines comparativos.

Table 1. Collecting sites, geographic coordinates and extent of chronologies generated in CRY in the States of Chihuahua, Sonora and outside the basin for comparison.

Nombre del sitio	Fecha de colecta	Clave del sitio	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (m)	Extensión cronologías (años)
Sitios de colecta en subcuenca El Novillo, estado de Chihuahua						
Tutuaca	24-07-2013	TUT	28.62	108.26	2 714	1534-2012 (479)
Cebadillas de Ocampo	17-10-2002	CDO	28.12	107.95	2 809	1588-2002 (415)
Bisaloachic	25-05-2003	BIS	28.66	108.29	2 553	1472-2002 (521)
Madera	17-09-2011	MAD	29.3	108.19	2 740	1774-2010 (237)
Mesa de las Guacamayas	16-06-2011	MDG	30.55	108.62	2 665	1600-2008 (409)
Basagochi	23-09-2011	CAC	28.01	107.81	2 290	1880-2010 (131)
Bocoyna	30-06-2011	ENA	28.08	107.86	2 420	1847-2010 (164)
Sitios de colecta en subcuenca presa La Angostura, estado de Sonora						
Sierra de los Ajos	24-10-1993	SLA	30.92	109.95	2 460	1838-1993 (156)
Bacadehuachi	05-05-1996	BAC	29.9	109.07	2 350	1739-1995 (256)
Sitios de colecta fuera de la CRY						
Cerro Mohinora	07-07-2006	MOH	25.93	107.02	2 950	1657-2005 (349)
Arnulfa	04-07-2012	ARN	26.47	106.35	2 590	1612-2011 (400)
Cabeza de Venado	06-07-2012	CAV	26.6	106.28	2 328	1826-2011 (186)

Seis de las cronologías (TUT, BIS, CDO, MAD, CAC, ENA) se ubicaron en la porción central de la subcuenca que drena hacia la presa “El Novillo” y una más (MDG) en el extremo norte de la misma subcuenca (Figura 1). Al considerar como referencia la serie dendrocronológica de anillo total del sitio Tutuaca, se determinó que existe una correlación que supera 0.60 ($p < 0.001$) para la mayoría de las series ubicadas dentro de la misma cuenca.

Respuesta climática de las cronologías

La cronología de Tutuaca y la regional integrada por los sitios CDO, MAD, MDG, TUT, BIS, CAC y ENA dentro de la subcuenca de la presa El Novillo, se comparó contra los datos de precipitación promedio de las estaciones climáticas presentes en esta subcuenca como son las estaciones “Peñitas” (29.217° latitud norte, 108.023° longitud oeste; 2,212 m), “Tres Ojitos” (28.917° latitud norte, 108.083° longitud oeste; 2 600 m), “Madera” (29.20° latitud norte, 108.10° longitud oeste; 2 092 m) y “La Junta” (28.75° latitud norte, 107.96° longitud oeste; 2 053 m). Tanto la cronología estándar EW del sitio Tutuaca, como la regional, mostraron una correlación significativa con la precipitación acumulada febrero-mayo con valores de 0.73 y 0.74 (1938-1988, $p < 0.01$), respectivamente. Para fines de reconstruir la variabilidad de lluvia, se utilizó la cronología regional, la cual integra la variabilidad del clima en esta zona y es más representativa de las condiciones hidroclimática dominantes de la subcuenca.

Los registros de precipitación disponible (1938-1988) se dividieron en dos subperíodos con fines de calibración (1938-1964) y verificación (1965-1988). Debido a que ambos subperíodos fueron significativos con correlaciones de 0.83 y 0.71, respectivamente, se utilizó el período total de datos disponibles (1938-1988) para generar un modelo lineal de reconstrucción, el cual fue el siguiente:

$$\text{Ppt} = 121.078544 + 182.078838X_i$$

Donde: Ppt= es la precipitación reconstruida estacional febrero-mayo (mm); X_i = es el índice anual de madera temprana.

La reconstrucción estacional febrero-mayo (invierno-primavera) mostró alta variación interanual en 479 años (1534-2012) de extensión de la reconstrucción (Figura 2). Períodos extremadamente secos se presentaron en 1541-1552, 1608-1624, 1666-1676, 1681-1695, 1733-1743, 1770-1779, 1801-1806 (excepto, 1804), 1840-1843, 1860-

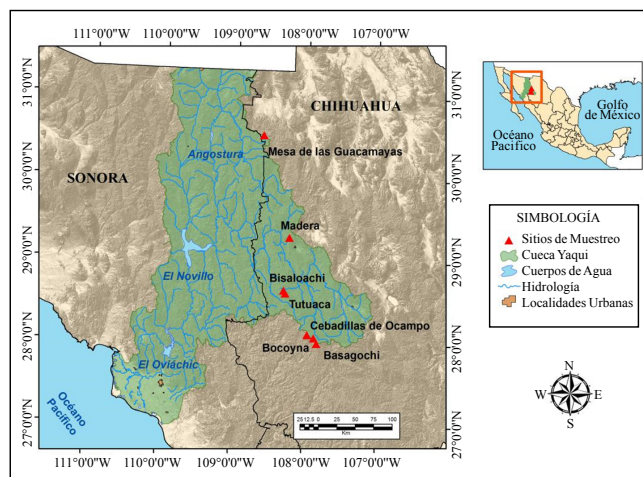


Figura 1. Distribución geográfica de sitios de muestreo de Douglas-fir en la CRY para la generación de series dendrocronológicas.

Figure 1. Geographical distribution of sampling sites of Douglas-fir in the CRY for generating dendrochronological series.

Climatic response of the chronologies

The chronology of Tutuaca and the regional integrated by CDO, MAD, MDG, TUT, BIS, CAC and ENA sites within the sub-basin of El Novillo, was compared against the average rainfall data from weather stations on this sub-basin such as "Peñitas" stations (29,217° north latitude, 108.023° west longitude, 2 212 m), "Tres Ojitos" (or 28.917° North latitude, 108.083° west longitude, 2 600 m), "Madera" (29.20° North latitude, 108.10° west longitude, 2 092 m) and "La Junta" (28.75° north latitude, 107.96° west longitude, 2 053 m). The standard chronology EW of the Tutuaca site, as well as the regional showed a significant correlation with cumulative rainfall from February to May with values of 0.73 and 0.74 (from 1938 to 1988, $p < 0.01$), respectively. For purposes of reconstructing the variability of rainfall, the regional chronology was used, which integrates climate variability in this area and is more representative of the dominant hydroclimatic conditions of the sub-basin.

Available precipitation records (1938-1988) were divided into two sub-periods for calibration (1938-1964) and verification (1965-1988). Because both sub-periods with significant correlations were 0.83 and 0.71, respectively, the total period of data (1938-1988) was used to generate a linear model reconstruction, which is as follows:

$$\text{Ppt} = 121.078544 + 182.078838X_i$$

1866, 1879-1887, 1892-1894, 1908-1911, 1934-1939, 1949-1956, 1959-1963, 1993-1996 y 2002-2012 (excepto 2010). Los períodos húmedos fueron menos frecuentes y de menor duración y algunos de los más intensos ocurrieron en 1569-1603, 1649-1655, 1744-1747, 1780-1784, 1872-1878, 1923-1926 y 1983-1987.

La cronología regional estándar EW mostró una asociación significativa ($r = 0.55$, 1902-2003, $n = 102$, $p < 0.001$) con la precipitación reconstruida invierno-primavera (noviembre-abril) para la CRY. Por lo que respecta a la cronología regional LW, esta no indicó ninguna asociación con el índice de precipitación de verano para el área total de la CRY; valores generados al integrar la base de datos de Hulme *et al.* (1998) del período 1900-1996 y de Zhu y Lettermaier (2007) de 1925-2004 (Nicholas y Battisti, 2008).

Para el caso de la presa El Novillo, la mayor correlación ($r = 0.41$, 1964-2006, $n = 43$, $p < 0.05$) se produjo al relacionar la cronología regional longitud oeste y los volúmenes acumulados mensuales de los tributarios de dicha subcuenca para el período enero-mayo. Finalmente, el volumen anual de los tributarios de la presa Oviachi estuvo correlacionado con la cronología regional RW ($r = 0.49$, 1952-2006, $n = 55$, $p < 0.01$).

La asociación entre las entradas (aportaciones deducidas + lluvias) del sistema de presas del Río Yaqui y la cronología regional EW, mostró una asociación significativa ($r = 0.71$, 1956-2012, $p < 0.01$), por lo que esta asociación se utilizó para reconstruir los volúmenes totales de entradas de flujo a las presas. Los registros disponibles se dividieron en dos porciones, una para calibración (1984-2012) y otro para verificación (1957-1983). Las correlaciones encontradas para ambos subperíodos fueron de 0.76 ($p < 0.01$) y 0.72 ($p < 0.01$), respectivamente y debido a la significancia de ambos subperíodos, se utilizó el período total (1957-2012) de datos disponibles para generar el modelo de reconstrucción, que fue el siguiente:

$$\text{Entradas} = 2.09149115 + 0.94629959X_i$$

Donde: entradas = total de volumen de escurrimiento registrado por los tributarios de la CRY; X_i = Índice de madera temprana de la cronología estándar regional.

Al aplicar el modelo lineal a los índices regionales EW, se generó una reconstrucción de los volúmenes en logaritmos base 10, valores que mediante el antilogaritmo se transformaron a volúmenes estacionales (Figura 3). La

Where: Ppt= is the reconstructed seasonal rainfall from February to May (mm); X_i = annual rate of earlywood.

The seasonal reconstruction from February to May (winter-spring) showed high inter-annual variation in 479 years (1534 to 2012) of extension of the reconstruction (Figure 2). Extremely dry periods occurred in 1541-1552, 1608-1624, 1666-1676, 1681-1695, 1733-1743, 1770-1779, 1801-1806 (except 1804), 1840-1843, 1860-1866, 1879-1887, 1892-1894, 1908-1911, 1934-1939, 1949-1956, 1959-1963, 1993-1996 and 2002-2012 (except 2010). Wet periods were less frequent and of shorter duration and some of the most intense occurred in 1569-1603, 1649-1655, 1744-1747, 1780-1784, 1872-1878, 1923-1926 and 1983-1987.

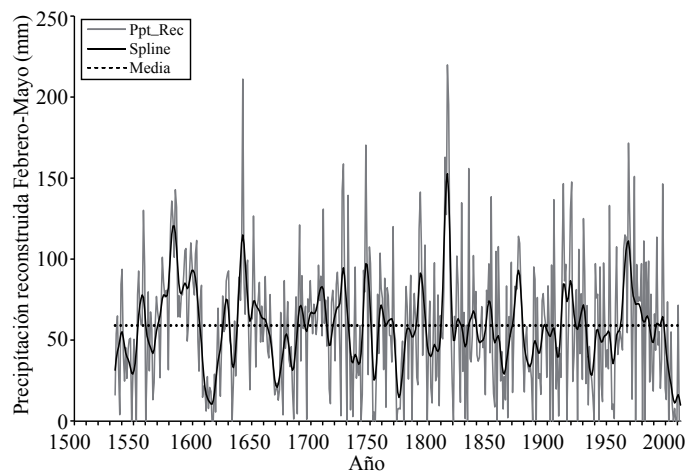


Figura 2. Reconstrucción estacional de la precipitación invierno-primavera (febrero-mayo) para la subcuenca productora de agua en parte de la SMO en el estado de Chihuahua y que drena hacia la CRY.

Figure 2. Seasonal reconstruction of the precipitation winter-spring (February-May) for the producing sub-basin of water of the SMO in the State of Chihuahua and drainage towards CRY.

The standard regional chronology EW showed a significant association ($r = 0.55$, 1902-2003, $n = 102$, $p < 0.001$) with the reconstructed winter-spring precipitation (November-April) for CRY. Regarding the regional chronology LW, it did not indicate any association with summer precipitation index for the total area of the CRY; values generated by integrating the database of Hulme *et al.* (1998) for the period 1900-1996 and Lettermaier and Zhu (2007) from 1925 to 2004 (Nicholas and Battisti, 2008).

In the case of El Novillo dam, the highest correlation ($r = 0.41$, 1964-2006, $n = 43$, $p < 0.05$) occurred by linking the regional chronology west longitude and the monthly

reconstrucción mostró alta variabilidad en el tiempo, con la presencia de períodos secos y húmedos aún más intensos que los detectados en los registros instrumentales hidrométricos; situación indicativa de la probabilidad de que se puedan presentar nuevamente eventos de tal magnitud.

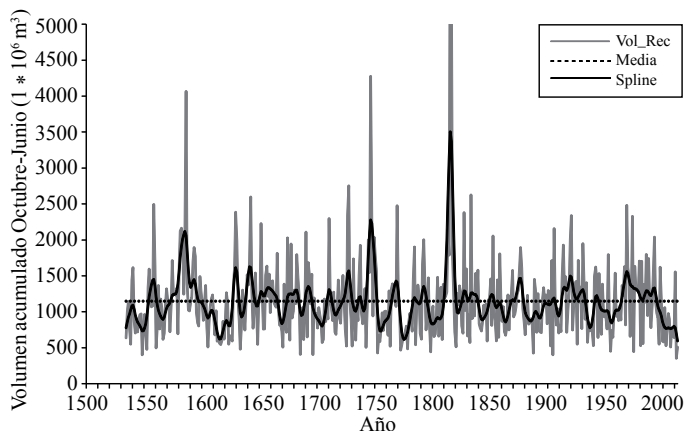


Figura 3. Entradas acumuladas octubre-junio de los volúmenes reconstruidos de los últimos 479 años (1532-2012), de los principales ríos que alimentan la CRY.

Figure 3. Accumulated entries from October to June of the reconstructed volumes of the last 479 years (1532-2012) of the main rivers that feed the CRY.

La relación entre la reconstrucción de volúmenes escurridos (octubre-junio) en la CRY y la precipitación invierno-primavera (febrero-mayo) de la parte alta de la cuenca en el estado de Chihuahua, indicó una correlación de 0.83 ($p < 0.001$), valor altamente significativo para los últimos 479 años, e indicativo de la gran importancia hidrológica de las cuencas ubicadas en la SMO para explicar la variabilidad en la disponibilidad de agua en el Valle del Yaqui. Al igual que con la precipitación, los períodos con disponibilidad de volúmenes inferiores a la media fueron más frecuentes que aquellos con mayor escurrimiento (Figura 4).

Los volúmenes reconstruidos, se caracterizan por la dominancia de períodos secos de 2 a 5 años (52 eventos), aunque también se presentaron períodos hasta de más de 10 años consecutivos (4 eventos), como los ocurridos de 1541 a 1552, 1610-1620, 1771-1782 y 1998-2008. Los períodos húmedos fueron menos comunes y dominaron los de dos (24 eventos) y tres años consecutivos (3 eventos) y sólo los intervalos de 1638-1643, 1580-1587 y 1809-1818, superaron seis años con escurrimientos superiores al promedio.

cumulative volumes of the tributaries of such sub-basin for the period from January to May. Finally, the annual amount of the tributaries of the dam Oviachi was correlated with the regional chronology RW ($r = 0.49$, 1952-2006, $n = 55$, $p < 0.01$).

The association between the inputs (deducted contributions + rainfall) of the system of dams of the Yaqui river and regional chronology EW, showed a significant association ($r = 0.71$, 1956-2012, $p < 0.01$), so this association was used to reconstruct the total volumes of flow entries of the dams. Available records were divided into two portions, one for calibration (1984-2012) and another for verification (1957-1983). The correlations for both sub-periods were 0.76 ($p < 0.01$) and 0.72 ($p < 0.01$), respectively, due to the significance of the two sub-periods, the total period (1957-2012) of available data was used to generate the model reconstruction, which was as follows:

$$\text{Entries } 0.94629959X = 2.09149115 + i$$

Where: entries = total runoff volume recorded by the tributaries of the CRY; Xi = index of earlywood of the regional standard chronology.

By applying the linear model of indexes EW, we generated a reconstruction of the volumes in logarithms base 10, values transformed by the antilog into seasonal volumes (Figure 3). The reconstruction showed high variability over time in the presence of dry and wet periods even more intense than those detected in the hydrometric instrumental records; indicative situation of the probability that events of that scale might be presented again.

The relationship between the reconstruction of drained volumes (October to June) in the CRY and the winter-spring precipitation (February-May) in the upper basin in the State of Chihuahua, indicated a correlation of 0.83 ($p < 0.001$) indicative of the great importance of hydrological basins in the SMO to explain the variability in water availability in the "Valle del Yaqui", highly significant value for the last 479 years. As with precipitation, periods of availability of below-average volumes were more frequent than those with higher runoff (Figure 4).

Asociación entre los índices de oscilación del sur y la serie dendrocronológica regional

Uno de los fenómenos de mayor impacto en la variabilidad hidroclimática del norte de México es ENSO, en particular durante su fase cálida, que se caracteriza por un incremento en la precipitación invernal (Stahle *et al.*, 1998). Al comparar los índices de la cronología regional EW e índices del SOI, como los generados por Allan *et al.* (1996), National Climatic Data Center (NOAA, 2014), TRI (Wright, 1970) y los reconstruidos para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998), se encontró una asociación significativa entre ambas variables (Cuadro 2).

Cuadro 2. Relación ente la cronología regional EW para la CRY y los índices estacionales promedio SOI del período invierno-primavera.

Table 2. Relationship between the regional chronology EW for the CRY and average seasonal indices SOI of the winter-spring period.

Variable	Período	Correlación	Fuente
SOI reconstruido	1706 -1977	- 0.59	Stahle <i>et al.</i> (1998)
Allan SOI	1876 -1996	- 0.49	Allan <i>et al.</i> (1996)
TRI ene.-jun.	1895 -1995	0.48	Wright (1970)
TRI ene.-abr.	1895 -1995	0.52	Wright (1970)
SOI ene.-jun.	1880 -2012	- 0.52	(NOAA, 2014)
SOI ene.-abr.	1880 -2012	- 0.54	(NOAA, 2014)

La relación encontrada entre los índices SOI reconstruidos para el norte de México y la serie regional EW, corroboran el efecto favorable de este fenómeno al incrementar la precipitación del período invernal en esta región. No obstante, esta influencia no ha sido estable y ha mostrado fluctuaciones a través del tiempo (Figura 5). De esta manera en subperíodos de 25 años, las correlaciones encontradas fueron mínimas de 1756 a 1780 ($r= 0.01$), aunque en otros subperíodos superaron una correlación de 0.70. Los resultados anteriores indican que en esta región, el crecimiento anual de la madera temprana explica hasta 35% de la variabilidad de ENSO.

El fenómeno del Monzón de Norteamérica tiene una influencia elevada en esta región, particularmente en el verano, donde se produce más de 50% de los escurrimientos que se registran en las presas (Douglas *et al.*, 1993), no obstante lo anterior, su variabilidad interanual y multianual es comparativamente menor con relación a la media histórica. En este estudio, no se

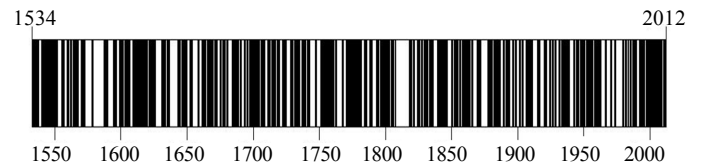


Figura 4. Años en que las entadas acumuladas a la CRY en el período octubre-junio fueron inferiores a la media. (Barras negras) y aquellos con escurrimientos por encima de la media (barras blancas). Se observa la dominancia de escurrimientos inferiores al promedio.

Figure 4. Years with entries accumulated in the CRY in the period from October to June below the average. (Black bars) and those with runoff above the mean (bars). Dominance of below average runoff is observed.

The reconstructed volumes are characterized by the dominance of dry periods of 2 to 5 years (52 events), although, the periods were also presented to more than 10 consecutive years (4 events), as occurred in 1541-1552, 1610-1620, 1771-1782 and 1998-2008. Wet periods were less common and dominated the two (24 events) and three consecutive years (3 events) and only the intervals 1638-1643, 1580-1587 and 1809-1818, exceeded six years with above-average runoff.

Association between the southern oscillation index and regional dendrochronological series

One of the phenomena of greatest impact in the hydroclimatic variability in northern Mexico is ENSO, particularly during the warm phase, characterized by an increase in winter precipitation (Stahle *et al.*, 1998). Comparing the rates of regional EW chronology and indices SOI, as well as those generated by Allan *et al.* (1996), National Climatic

encontró una relación significativa entre el índice EW, LW o RW con la precipitación regional de verano reconstruida por Nicholas y Battisti (2008) para la CRY; resultado que se refleja en el pobre potencial de los anillos de Douglas.

Data Center (NOAA, 2014), TRI (Wright, 1970) and the reconstructed for northern Mexico (Stahle *et al.*, 1998), a significant association between the two variables was found (Table 2).

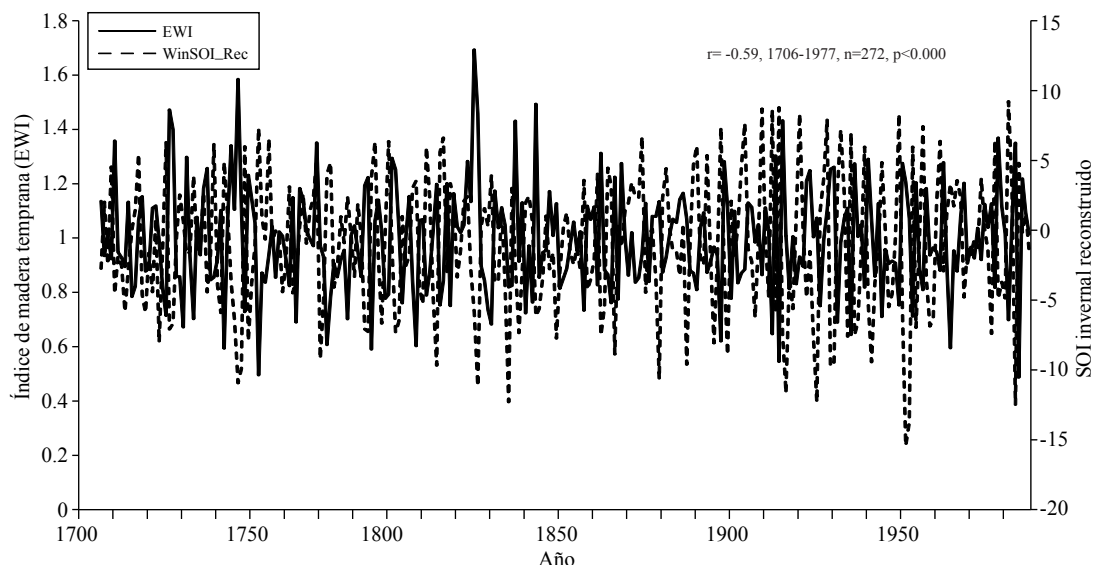


Figura 5. Relación entre la cronología regional EW de la CRY y el índice SOI reconstruido para el norte de México. La relación es negativa, ya que mientras los SOI se tornan negativos (años Niño) el crecimiento de la madera temprana se incrementa.
Figure 5. Relationship between the regional chronology EW of the CRY and the reconstructed SOI index for northern Mexico. The relationship is negative, because while the SOI turned negative (El Niño years), the growth of earlywood increases.

Discusión

Las series dendrocronológicas generadas en la porción oriental de la CRY en el estado de Chihuahua, mostraron una variabilidad interanual y multianual común, como se deduce de las altas correlaciones observadas entre las cronologías individuales (0.60 a 0.75). Este comportamiento similar, resulta del impacto de variables climáticas comunes que afectan por igual esta zona en una superficie aproximada de 15 000 km² y que no obstante, constituir sólo 21% de la superficie total de dicha cuenca, representa una fuente hidrológica de gran importancia para la disponibilidad de escurrimientos en el Valle del Yaqui.

Cronologías de *Pseudotsuga menziesii* desarrolladas en el norte de México son muy sensibles a la variabilidad hidroclimática, como se ha demostrado con diversas reconstrucciones de precipitación para Chihuahua (Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2009) y Durango (Cleaveland *et al.*, 2003; González *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2005).

The relationship found between the SOI indices reconstructed for northern Mexico and the regional EW series corroborate the favourable effect of this phenomenon by increasing the precipitation of the winter period in this region. However, this influence was not stable and showed fluctuations over time (Figure 5). Thus, in sub-periods of 25 years, the correlations were minimal from 1756 to 1780 ($r = 0.01$), although in other sub-periods exceeded a correlation of 0.70. These results indicated that in this region, the annual growth of earlywood explains up to 35% of the variability of ENSO.

The North American Monsoon phenomenon has a significant influence in this region, particularly in the summer, where over 50% of the runoff occur at the dams (Douglas *et al.*, 1993), notwithstanding the foregoing, the inter-annual and multi-annual variability is comparatively low relative to the historical average. In this study, we did not find any significant relationship between the index EW, LW or RW with the regional precipitation in summer reconstructed by Nicholas and Battisti (2008) for the CRY; result reflected in the poor potential of Douglas rings.

La serie regional EW para la cuenca alta del río Yaqui fue sensible a la precipitación invierno-primavera, la reconstrucción desarrollada para este sector de la cuenca es importante para cuantificar la precipitación que ocurre en esta época del año, de la cual depende el crecimiento de madera temprana de coníferas de interés comercial y al mismo tiempo, permite determinar las fluctuaciones en la disponibilidad hídrica en el período invernal, donde se presentan lluvias, que aunque no son de gran intensidad, si favorecen su almacenamiento en la matriz del suelo, para ser utilizado posteriormente por los árboles al inicio de la estación de crecimiento (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2009).

Las grandes sequías detectadas en la reconstrucción de lluvia estacional como las ocurridas en 1541-1552, 1608-1624, 1733-1743, 1770-1779, 1860-1866, 1879-1887, 1934-1939, 1943-1956 y 1993-2012, han sido reportadas en reconstrucciones previas para Durango y Chihuahua (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2009; Sosa-Nájera *et al.*, 2010), y algunas de ellas como las de la década de 1550, también se registraron para el noreste y centro de México (Therrell *et al.*, 2006). Los efectos de estas sequías afectaron la disponibilidad de alimentos y en algunas de ellas se presentaron hambrunas y epidemias que diezmaron notablemente la población indígena, como es el caso de la sequía de 1540-1550, que afectó severamente el centro y norte de México (Acuña-Soto *et al.*, 2002).

En el estado de Chihuahua y con base a documentos históricos, Endfield y Fernández (2006), reportan crisis de producción de alimentos y presencia de epidemias en los siglos XVIII y XIX, particularmente en las décadas de 1730 y 1740. Los años de 1785 y 1786 conocidos como “El Año del Hambre” fueron de gran escases de alimentos debido a una sequía generalizada que impactó principalmente el centro de México (Florescano, 1980).

En el período de 1804 a 1806 se presentó una sequía muy intensa en la región de Chihuahua y Durango que produjo crisis de producción de alimentos. Los períodos de sequías severas como los ocurridos en las décadas de 1860, 1890, 1900, 1950 y 1990 han sido reportados en diversas reconstrucciones paleoclimáticas (Villanueva *et al.*, 2009) y para la sequías recientes (1992-2004; 2002-2012) datos de producción agrícola para la CRY indican un impacto, tanto en la superficie cultivada como en rendimientos unitarios de trigo (CONAGUA, 2008; Cruz y García, 2008).

Discussion

The dendrochronological series generated in the eastern portion of the CRY in the State of Chihuahua, showed a common annual and multi-annual variability, as inferred from the high correlations between individual chronologies (0.60 to 0.75). This similar behaviour is the impact of common climatic variables that affect the zone in an area of approximately 15 000 km², which nevertheless constitute only 21% of the total area of the basin, represents a very important source of water to the availability of runoff in the Valle del Yaqui.

Chronologies of *Pseudotsuga menziesii* developed in northern Mexico are very sensitive to hydroclimatic variability, as demonstrated with various reconstructions of precipitation for Chihuahua (Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2009) and Durango (Cleaveland *et al.*, 2003; González *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2005).

The regional series EW for the upper basin of the Yaqui river was sensitive to the winter-spring precipitation, the reconstruction developed for this sector of the basin is important to quantify the precipitation that occurs at this time of the year, of which depends the growth of earlywood of conifers of commercial interest and at the same time determine the fluctuations in water availability in the winter, with rains, though not of great intensity, it does promote storage in the soil matrix, for being used for the trees at the start of the growing season (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2009).

The major droughts detected in the rebuilding of seasonal rainfall as those occurred in 1541-1552, 1608-1624, 1733-1743, 1770-1779, 1860-1866, 1879-1887, 1934-1939, 1943-1956 and 1993-2012, have been reported in previous reconstructions for Durango and Chihuahua (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2009; Sosa-Nájera *et al.*, 2010), and some of them like in the 1550s were also recorded for the northeastern and central Mexico (Therrell *et al.*, 2006). The effects of these droughts affected the availability of food and some famines and epidemics that decimated the indigenous population remarkably presented, such as the drought of 1540-1550, which severely affected the central and northern Mexico (Acuña-Soto *et al.*, 2002).

La relación observada entre las series dendrocronológicas desarrolladas en cada una de las subcuencas y los volúmenes de escurrimiento registrados en las presas fue significativa. Para el caso de la presa La Angostura, la serie dendrocronológica EW del sitio MDG, explica 45% de los escurrimientos que en ella se registran de octubre a junio, información que corrobora su alto potencial para el desarrollo de reconstrucciones históricas de esta variable. Series dendrocronológicas individuales como Tutuaca, o Bisaloachi, no estuvieron correlacionadas con los volúmenes de escurrimiento registrados en las presas El Novillo u Oviachi, pero sí con la cronología regional de anillo total o de madera tardía; las correlaciones, sin embargo, aunque significativas, no superaron 0.49 ($p < 0.05$, 1952-2006), lo cual habla de la necesidad de ampliar la red dendrocronológica en cada una de las subcuencas para reconstruir su flujo histórico y analizar con detalle su variabilidad en el tiempo.

La capacidad de las cronologías con fines de analizar la variabilidad en la disponibilidad de los recursos hídricos en la CRY, se manifiesta al integrar series de cronologías con una respuesta común; en este aspecto, la cronología regional EW integrada por siete cronologías distribuidas en la subcuenca de la presa El Novillo, explicó la variabilidad en los escurrimientos acumulados octubre-junio para toda la CRY, volúmenes que constituyen 43% de los escurrimientos registrados durante el ciclo agrícola. Esta reconstrucción sugiere que la planeación del ciclo agrícola en términos de superficie cultivada, no debe fundamentarse en los registros de escurrimientos promedio de los últimos 70 años; en contraste, deben considerarse eventos extremos hasta de 10 años consecutivos que se presentan al menos una vez por siglo y que han afectado el valle del Yaquí en los últimos 479 años.

La variabilidad hidroclimática detectada en esta región y en particular durante el período invernal, tiene alta influencia de ENSO (Stahle *et al.*, 1998; Nicholas y Battisti, 2008). La asociación encontrada entre los índices EW y SOI reconstruidos fue de -0.59, situación que implica que la fase cálida de este fenómeno produjo un efecto favorable al incrementar la precipitación invernal, pero también sequías intensas durante la fase fría, como ocurrió en última década, con una reducción drástica en la superficie cultivada.

Conclusiones

Las series dendrocronológicas desarrolladas en al CRY y en particular, las ubicadas en la subcuenca El Novillo, poseen una variabilidad interanual y multianual similar, debido a

In the State of Chihuahua and based on historical documents, Endfield and Fernández (2006) reported food production crisis and presence of epidemics in the eighteenth and nineteenth centuries, particularly in the 1730s and 1740s. The years of 1785 and 1786 known as "The Year of Hunger" were of great food shortages due to widespread drought that hit mainly the Center of Mexico (Florescano, 1980).

In the period 1804-1806 a severe drought in the region of Chihuahua and Durango crisis that produced food production was presented. Periods of severe drought as those occurred in the 1860, 1890, 1900, 1950 and 1990 have been reported in various paleoclimatic reconstructions (Villanueva *et al.*, 2009) and for the recent droughts (1992-2004, 2002-2012) agricultural production data for the CRY indicate an impact, in both cultivated surface as well as in units yields of wheat (CONAGUA, 2008; Cruz and García, 2008).

The observed relationship between the dendrochronological series developed in each of the sub-basins and runoff volumes recorded in dams was significant. In the case of La Angostura Dam, the dendrochronological series EW of the MDG site explains 45% of the runoff therein recorded from October to June, information that confirms its high potential for the development of historical reconstructions of this variable. Individual dendrochronological series like Tutuaca or Bisaloachi were not correlated with runoff volumes recorded in the dams El Novillo or Oviachi, but with the total regional chronology or latewood ring; correlations, however, although significant, did not exceed 0.49 ($p < 0.05$, 1952-2006), which shows the need to expand the dendrochronological network in each of the sub-basins to rebuild its historic flow and analyse in detail its variability over time.

The ability of the chronologies looking to analyse the variability in the availability of water resources in the CRY, manifested by integrating series of chronologies with a common response; in this aspect, the regional chronology EW conformed of seven chronologies distributed in the sub-basin of El Novillo explained the variability in runoff accumulated from October to June for all the CRY, volumes that constitute 43% of the runoff recorded during the agricultural cycle. This reconstruction suggests that the planning of the agricultural cycle in terms of cultivated area should not be based on average runoff records of the last 70 years; in contrast, we should considered extreme events up to 10 consecutive years presented at least once per century, which have affected the Valle del Yaquí in the last 479 years.

que son afectados por fenómenos climáticos, que ejercen una influencia común en el crecimiento radial Douglas-fir en esta región. Este comportamiento permitió integrar las series dendrocronológicas en una cronología regional, representativa de toda la cuenca y de utilidad para reconstruir y analizar la variabilidad de lluvia estacional, escurrimientos y definir el impacto de patrones de circulación general como ENSO, en más de 450 años de extensión de las series generadas.

Los registros de escurrimiento en la Presa La Angostura estuvieron relacionados significativamente con la serie dendrocronológica EW del sitio MDG; esta relación aunque significativa, pudiera mejorarse mediante la generación de una red dendrocronológica a nivel subcuenca, con la que se captaría toda la variabilidad climática que en ella ocurre.

Las reconstrucciones de precipitación estacional y de escurrimientos con la serie regional EW estuvieron altamente correlacionadas, lo que implica, que la precipitación invierno-primavera determina los escurrimientos que se presentan en el período octubre-junio y que constituyen el 43% de los registrados en la CRY. La precipitación de verano, que origina 57% de los escurrimientos y que se presenta de julio a septiembre, está influenciada por el Monzón de Norteamérica, el cual no mostró alta variabilidad interanual y no se reflejó en el crecimiento de la madera tardía; situación que sugiere la necesidad de desarrollar una red dendrocronológica más completa de series de madera tardía de Douglas-fir y de otras coníferas, que permitan definir con mayor claridad, el efecto potencial de la precipitación en el incremento radial de las especies arbóreas involucradas.

La variabilidad de interanual en el crecimiento de la madera temprana en la CRY estuvo asociada significativamente con los SOI, esta relación aunque alta no fue constante en el tiempo, pero en ciertos subperíodos superó 0.70, lo que le confiere el potencial para generar modelos de predicción de escurrimientos con base a la relación incremento radial-ENSO. Muchos de los períodos secos y húmedos detectados en las reconstrucciones han sido reportados en reconstrucciones para el norte y centro de México, lo que sugiere que estudios de este tipo deben promoverse para un mejor entendimiento de la variabilidad hidroclimática natural y la provocada por causas antropogénicas.

The hydroclimatic variability detected in this region, particularly during the winter period has high influence of ENSO (Stahle *et al.*, 1998; Nicholas and Battisti, 2008). The association found between the reconstructed indices EW and SOI was -0.59, a situation that implies that the warm phase of this phenomenon was a favourable effect by increasing winter precipitation, but also intense droughts during the cold phase, as in the past decade with a drastic reduction in acreage.

Conclusions

The dendrochronological series developed in the CRY and in particular those located in the sub-basin El Novillo have a similar annual and multi-annual variability because they are affected by climatic events, making a common influence on radial growth of Douglas-fir in this region. This behaviour allowed integrating the dendrochronological series in a regional chronology, representative of the entire basin and useful to reconstruct and analyse the variability of seasonal rainfall, runoff and define the impact of general circulation patterns, such as ENSO, in over 450 years of the generated series.

Runoff records in the dam La Angostura were significantly related to the dendrochronological series EW of the site MDG; this relationship although significant, could be improved by generating a dendrochronological network at sub-basin level, capturing all the climate variability.

Reconstructions of seasonal precipitation and runoff with the regional series EW were highly correlated, implying that the winter-spring precipitation determines runoff that occur in the period from October to June and constitute 43% of those recorded in the CRY. Summer precipitation, which causes 57% of the runoff presented from July to September is influenced by the North American Monsoon, which did not show high inter-annual variability and was not reflected in the growth of latewood; This situation suggests the need to develop a dendrochronological network more complete of latewood series of Douglas-fir and other conifers, in order to define more clearly the potential effect of precipitation on radial increment of tree species.

Agradecimientos

La presente investigación se apoyo con fondos del Instituto Interamericano para la investigación del cambio climático (IAI) a través del proyecto CRN # 2047, a su vez financiado por el US/Nacional Science Foundation (Grant GEO-0452325); asimismo, se tuvo apoyo del proyecto fiscal “Cambio climático y su impacto sobre el potencial productivo, agrícola, forrajero y forestal en México”.

Literatura citada

- Acuña-Soto, R.; Stahle, D. W.; Cleaveland, M. K. and Therrell, M. D. 2002. Megadrought and megadeath in 16th century Mexico. *Revista Biomedica* 13:289-292.
- Allan, R.; Lindsay, J. and Parker, D. 1996. El Niño/Southern Oscillation & climate variability. CSIRO Publishing. Atmospheric Research, Australian National University, United Kingdom. Meteorological Office. 408 p.
- Cerano Paredes, J.; Villanueva, D. J.; Valdez, R. D. C.; Constante, G. V.; González, B. J. L. y Estrada, A. J. 2012. Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Rev. Mex. Cienc. Fores.* 2(10):7-23.
- Cleaveland, M. K.; Stahle, D. W.; Therrell, M. D.; Villanueva, D. J. and Burns, B. T. 2003. Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59:369-388.
- Comisión Estatal del Agua. 2008. Estadísticas del agua en Sonora. México, D. F. 237 p.
- Cruz Medina, R. E. y García Páez, F. 2008. Modelación de escurrimiento del río Yaqui. *Terra Latinoamericana*. 26(2):145-152.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2008. Statistics on water in Mexico. México, D. F. 186 p.
- Cook, E.R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47:37-59.
- Díaz, S. C.; Therrell, M. D.; Stahle, D. W. and Cleaveland, M. K. 2002. Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings. *Climate Res.* 22(3):237-244.
- Douglas M. W.; Maddox R.; Howard, K. and Reyes, S. 1993: the Mexican monsoon. *J. Climate* 6:665-1667.
- Endfield, G. H. and Fernández I. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climate Change* 75:395-419.
- Florescano, E. 1980. Una historia olvidada: la sequía en México. *Rev. Nexos* 32:9-13.
- Fritts, H.C. 1976. *Tree rings and climate*. London Academic Press. New York. 565 p.
- González-Elizondo, M.; Jurado, E.; Navar, J.; González-Elizondo, M. S.; Villanueva, J.; Aguirre, O. and Jiménez, J. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681-2001 rain reconstruction. *Forest Ecol. Management*. 213:39-53.
- Griffin, D.; Meko, D. M.; Touchan, R.; Leavitt, S. W. and Woodhouse, C. A. 2011. Latewood chronology development for summer-moisture reconstruction of the US Southwest. *Tree-Ring Res.* 67(2):87-101.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*. 43:69-78.
- Hulme, M. T.; Osborn, J. and Johns, T. C. 1998: Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophysical Research Letters* 25:3379-3382.
- Lutz, A. y Curl, K. 2014. Panorama de la Cuenca del Río Yaqui. <http://aquasec.org>.
- McCullough, E. 2005. Coping with drought: an analysis of crisis responses in the Yaqui Valley. Thesis of Master Degree. Department of Earth System Program. Stanford University, USA. 71 pp.
- Nicholas, R. E. and Battisti, D. S. 2008: Drought recurrence and seasonal rainfall prediction in the Río Yaqui Basin, Mexico. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47:991-1005.
- NOAA. 2014. SOI-National Climatic Data Center (<http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi.php>).
- Sosa-Nájera, S.; Lozano-García, S.; Roy, P. D. y Caballero, M. 2010. Registro de sequías históricas en el occidente de México con base en el análisis elemental de sedimentos lacustres: el caso del lago de Santa María del Oro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 62(3):437-451.
- Stahle, D.W., R.D. Dárrigo, 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.; Burnette, J. D.; Villanueva-Díaz, J.; Heim, Jr. R. R.; Fye, F. K.; Cerano Paredes, J.; Acuna Soto, R. and Cleaveland, M. K. 2011. Pacific and Atlantic influences in Mesoamerican over the past millennium. *Climate Dynamics*: DOI 10.1007/s00382-011-1205-z.
- Stokes, M. A. and Smiley, T. L. 1968. *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press, Tucson, Az., USA. 73 pp.
- Therrell, M. D.; Stahle, D. W.; Villanueva-Díaz, J.; Cornejo-Oviedo, E. and Cleaveland, M. K. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central México: 1474-2001. *Climatic Change* 74:493-504.

End of the English version



- Vega-Granillo, E. L.; Cirett-Galán, S. De la Parra-Velasco, M. L. y Zavala-Juárez, R. 2011. Hidrogeología de Sonora, México. *In*: Calmus, T. (Ed.). Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Geología (IG).118(9): 57-88.
- Villanueva, D. J.; Luckman, B. H.; Stahle, D. W.; Therrell, M. D.; Cleaveland, M. K.; Cerano-Paredes, J.; Gutiérrez-García, G.; Estrada-Avalos, J. y Jasso-Ibarra, R. 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 Diaz, J.; Peter, F. Z.; Cerano, P. J.; Estrada, A. J. y Sánchez, C. I. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Cienc. Fores. Méx.* 34(105):37-69.
- Woodhouse, C. A.; Stahle, D. W. and Villanueva, D. J. 2012. Rio Grande and Rio Conchos water supply variability over past 500 years. *Climate Res.* 51:125-136.
- Wright, P. B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature* 277:371-374.
- Zhu, C. and Lettenmaier, D. P. 2007: Long-term climate and derived surface hydrology and energy flux data for Mexico, 1925-2004. *J. Climate*. 20:1936-1946.