

## Reconstrucción histórica de la precipitación en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México, mediante anillos de crecimiento en *Taxodium mucronatum* (Cupressaceae)

José Antonio Osorio-Osorio<sup>1</sup>, Claudia C. Astudillo-Sánchez<sup>1\*</sup>, José Villanueva-Díaz<sup>2</sup>, Leroy Soria-Díaz<sup>3</sup> & Virginia Vargas-Tristán<sup>1</sup>

1. Facultad de Ingeniería y Ciencias, Centro Universitario Victoria, Universidad Autónoma de Tamaulipas Adolfo López Mateos, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C.P. 87149; jossant.osorio27@gmail.com, astudilloclaudiac@gmail.com, vvargas@docentes.uat.edu.mx
2. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP-CENID-RASPA), Margen Derecha del Canal Sacramento Km 6.5, Gómez Palacio, Durango, México, C.P. 35140; villanueva.jose@inifap.gob.mx
3. Instituto de Ecología Aplicada, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Av. División del Golfo No. 356. Col. Libertad, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México, C.P. 87019; leroysoriadiatz@gmail.com

\* Correspondencia

Recibido 09-XI-2019. Corregido 21-III-2020. Aceptado 26-V-2020.

**ABSTRACT. Historical precipitation reconstruction of El Cielo Biosphere Reserve, Mexico, using *Taxodium mucronatum* (Cupressaceae) annual growth rings. Introduction:** Historical knowledge of climate is essential to analyze its variability over time, as well as its impact on natural ecosystems and human populations. **Objective:** To analyze the annual growth of the sabino trees, also known as ahuehuate trees (*Taxodium mucronatum*) from the Sabinas River to reconstruct the historical variability of precipitation in El Cielo Biosphere Reserve, Tamaulipas, Mexico. **Methods:** The annual growth of 116 sabino samples was dated to develop a chronology of 544 years (1474-2017). The period that admitted a series of samples suitable for climate analysis extends from 1550 to 2017 (468 years). **Results:** Based on the analysis of the response function, it was determined that the winter-spring precipitation (November-May) significantly influenced the radial growth of sabinos in the study area ( $R=0.77$ ,  $P < 0.001$ ). The reconstruction recorded high climatic variability at interannual and interdecadal levels, in which the presence of droughts was identified at the beginning and end of each century, as well as the presence of extreme cyclical droughts every 50 years. These droughts stood out for their social and economic impact at the regional and national level. The most important droughts are the “*Año Uno Conejo*” (“Year One Rabbit”) according to the Aztec calendar in 1558. In 1696 with a strong impact in Northern Mexico. “*El Año del Hambre*” (“The Year of Hunger”) in 1785-1786. Also, the drought of 1801 that brought alongside food shortages. 1951 within the period of “Mass migration of the rural sector”; and the most recent drought, recorded in 2011. The most representative extreme rainfalls occurred in 1756 and 1816. **Conclusions:** If the precipitation pattern registered at El Cielo Biosphere Reserve continues, it is possible to expect the presence of extreme droughts in the mid and late 21<sup>st</sup> century.

**Key words:** tree rings; riparian forest; northern Mexico; droughts; rainfalls; climatic variability; dendrochronology.

Osorio-Osorio, J.A., Astudillo-Sánchez, C.C., Villanueva-Díaz, J., Soria-Díaz, L., & Vargas-Tristán, V. (2020). Reconstrucción histórica de la precipitación en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México, mediante anillos de crecimiento en *Taxodium mucronatum* (Cupressaceae). *Revista de Biología Tropical*, 68(3), 818-832.

Conocer las condiciones climáticas del pasado es difícil si se considera que el acopio de datos relacionados con el clima es reciente en el tiempo. En el caso de México, la mayoría de las estaciones meteorológicas disponibles tienen registros con menos de 70 años, por tal motivo se debe recurrir a fuentes indirectas. Una de ellas son los árboles o específicamente los anillos de crecimiento anuales de sus troncos, los cuales registran acontecimientos climáticos de forma confiable ocurridos durante la vida de cada árbol, la cual puede alcanzar cientos o incluso el milenio de años (Villanueva et al., 2010a).

Los árboles que producen anillos de crecimiento anuales bien definidos son en particular las especies de coníferas. Al fechar exactamente los crecimientos anuales de los troncos de estos árboles es posible establecer una relación entre el grosor de sus anillos y las condiciones climáticas que dominaron durante su formación. De esta forma, los anillos anchos o gruesos indican condiciones climáticas favorables para su crecimiento, mientras que los anillos angostos o delgados indican condiciones limitantes (Fritts, 1976). Una reconstrucción climática implica que la relación entre el grosor de los anillos de crecimiento de los árboles y los registros climáticos disponibles se apliquen al periodo de tiempo del cual no se tiene información climática, pero sí anillos de crecimiento. De esta manera, es posible inferir la presencia de sequías o periodos húmedos en el sitio donde se desarrollan los árboles (Stahle et al., 2011a; 2016).

La extensión de las cronologías de anillos arbóreos está determinada por la edad que puedan alcanzar las especies. Por lo tanto, mientras más longevas sean, mayor es la posibilidad de analizar las variables climáticas o ecológicas de interés que estén relacionadas con su crecimiento radial a través del tiempo. En México la especie arbórea más longeva es *Taxodium mucronatum* Ten. se le conoce como sabino o ahuehuate y es una conífera que puede alcanzar edades milenarias (Villanueva et al., 2007a; Stahle et al., 2012). Por su gran longevidad, se ha estudiado a *T. mucronatum* para realizar

estudios sobre su potencial para reconstrucciones climáticas, donde destaca su sensibilidad alta a la variación de la precipitación (Villanueva et al., 2007b). Esta característica ha hecho posible que la especie se utilice en el análisis del comportamiento de las sequías a lo largo de cientos de años en Mesoamérica y de manera particular, en México (Stahle et al., 2011a; 2011b, 2016).

La distribución extrema noreste del ahuehuate en México se localiza en el estado de Tamaulipas, donde se pueden encontrar aún porciones conservadas de bosque de galería. Una de esas áreas se ubica en la zona de influencia de la Reserva de la Biosfera El Cielo, donde el Río Sabinas nutre sus aguas a partir de los escurrimientos de la parte serrana de la reserva (González-Medrano, 2005; Mora-Olivo & Novelo-Retana, 2005; Gobierno del Estado de Tamaulipas & Instituto de Ecología Aplicada-UAT, 2013). Dado que *T. mucronatum* presenta una sensibilidad alta a la variación de la intensidad de lluvia durante su desarrollo, el objetivo de este estudio fue reconstruir la precipitación histórica de la Reserva de la Biosfera El Cielo a partir de los anillos de crecimiento anuales de *T. mucronatum* para identificar periodos extremos de lluvia y de sequía en la región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio:** La Reserva de la Biosfera El Cielo se localiza en el noreste de México en el estado de Tamaulipas, y abarca una porción de la Sierra Madre Oriental (22°55'30" - 23°25'50" N & 99°05'50" - 99°26'30" W). El Río Sabinas corre paralelo a los límites de la reserva y destaca por albergar una comunidad arbórea densa de 8 a 20 m de altura donde el componente principal es *Taxodium mucronatum*, debido a que es usual que las copas de los árboles de una ribera alcancen a tocar las copas de los árboles del otro margen del río, es común que a este tipo de vegetación se le llame bosque de galería (González-Medrano, 2005; Mora-Olivo & Novelo-Retana, 2005). En las zonas bajas por donde fluye el Río Sabinas tiene un

gradiente altitudinal entre 100 y 300 m.s.n.m., prevalece un clima cálido-subhúmedo con estación seca (5-6 meses). La temperatura media del mes más frío es mayor de 18 °C y la precipitación anual oscila entre 1 500 y 2 000 mm (INEGI, 2000).

**Muestreo de campo:** Se ubicaron rodales de *T. mucronatum* a lo largo del Río Sabinas y por muestreo selectivo se identificaron árboles con apariencia longeva, como son ramas gruesas, corteza lisa y retorcida (Villanueva et al., 2010a). Se extrajeron entre dos y cinco núcleos de crecimiento de cada árbol con taladros de Pressler (Haglof Inc., Madison, MS, EUA) de 50.8 a 71.12 cm de largo y con un diámetro interno de broca de 5.1 mm y de 2 a 3 cuerdas. La extracción de los núcleos se hizo a 1.3 m del suelo y perpendicular a la pendiente del terreno.

**Procesamiento de las muestras:** Los núcleos de crecimiento se colocaron en moldes acanalados de madera y se fijaron con pegamento. Para exponer los anillos de crecimiento, las muestras se pulieron con lijas de diferente grado (fino a grueso). Con un estereoscopio de resolución alta, se contaron y fecharon los anillos de crecimiento al año exacto de su formación (Stokes & Smiley, 1968). Después del fechado de las muestras, se midió el ancho total de cada anillo con una precisión de 0.001 mm a través de un Sistema Velmex y el programa de medición J2X. La calidad del fechado se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 1995). Para remover las tendencias biológicas y geométricas del crecimiento de los árboles que no están relacionadas con el clima, se utilizó el programa ARSTAN (Cook & Holmes, 1984), el cual ejecuta la estandarización de las series individuales de cada núcleo de crecimiento al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y dividir cada valor anual entre el valor obtenido de la curva, esto generó una serie de índices normalizados con media de 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987).

**Respuesta climática:** Para determinar la influencia de la precipitación en el crecimiento de los sabinos, se ubicaron las estaciones meteorológicas más cercanas a los sitios de recolecta: Ahualulco (22°59' N & 99°8' W), El Encino (23°8' & 99°6' W) y Sabinas (23°1' & 99°5' W), con una elevación de 100, 160 y 100 m.s.n.m., respectivamente. Todas con un periodo común de datos climáticos confiables de 33 años (1983-2015) con el cual se generó una serie regional de precipitación media para relacionarla con el crecimiento de los árboles. La relación entre los datos observados de la precipitación regional y el índice de ancho de anillo fue positiva. Por tal motivo, se generó un modelo de regresión lineal, en donde el índice de anillo se tomó como la variable independiente y la precipitación observada, la variable dependiente. El modelo de regresión se validó estadísticamente con dos pruebas, la mitad de los datos climáticos se utilizó para calibración y la otra mitad para verificación. La significancia de los periodos se analizó con la subrutina VERIFY (VFY) del programa Dendrochronology Program Library (DLP) (Fritts, 1991). De esta forma, se obtuvo la ecuación de transferencia para desarrollar la reconstrucción de la precipitación en el total de la cronología. A la serie de frecuencia alta (resolución anual) se le ajustó una curva decenal flexible "spline" para resaltar eventos de frecuencia baja (periodos secos o húmedos) (Cook & Peters, 1981).

**Validación de la reconstrucción climática:** Los periodos reconstruidos con sequías o humedad extremas se compararon con archivos históricos de la región y también nacionales; así como con reconstrucciones de precipitación previamente desarrolladas con anillos de árboles de coníferas del norte y noreste de México. Finalmente, con el propósito de mostrar las condiciones climáticas a nivel nacional y verificar los eventos climáticos extremos más representativos reconstruidos en este estudio, se generaron los mapas correspondientes a través de los datos disponibles del *Mexican Drought Atlas* (Stahle et al., 2016 [<http://drought.memphis.edu/MXDA/>]).

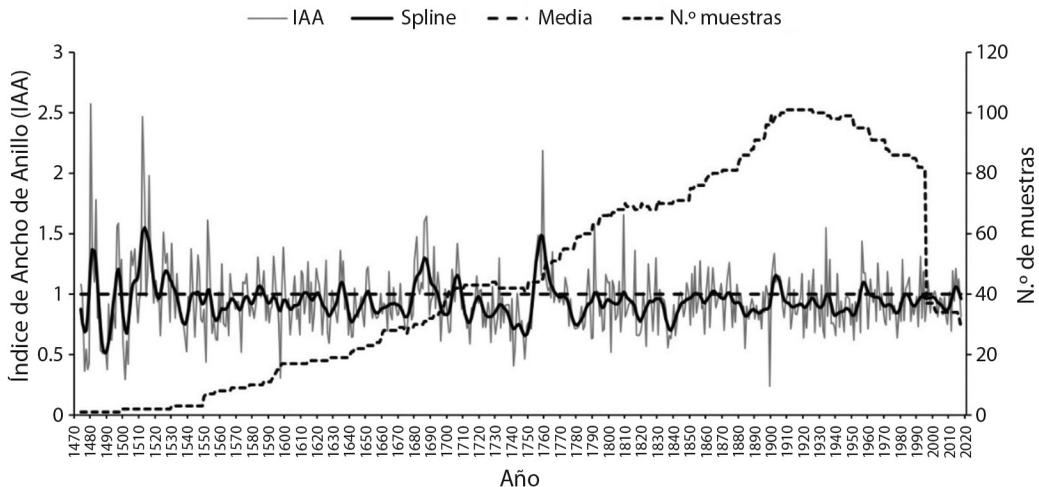
## RESULTADOS

De un total de 221 muestras recolectadas en campo, se lograron fechar al año exacto de su formación los crecimientos anuales de 116 muestras. El programa COFECHA determinó una correlación positiva y significativa ( $R = 0.478$ ,  $P < 0.0001$ ) entre series de crecimiento, lo que indica una calidad aceptable en el fechado. Dado que el programa establece que, para un fechado correcto y una calidad de respuesta climática buena, la correlación mínima significativa entre series de crecimiento tiene un valor de  $R = 0.3281$  ( $P < 0.01$ ) (Holmes, 1983).

**Desarrollo de la cronología:** La cronología de anillo total de *T. mucronatum* se extiende de 1474 a 2017 (544 años), con base en 116 núcleos procedentes de 58 árboles. No obstante, la cantidad de años que se logró fechar, se observa cómo el número de muestras disminuye en la parte temprana de la cronología. Debido a esto, se empleó el parámetro de la intensidad de señal de la submuestra SSS

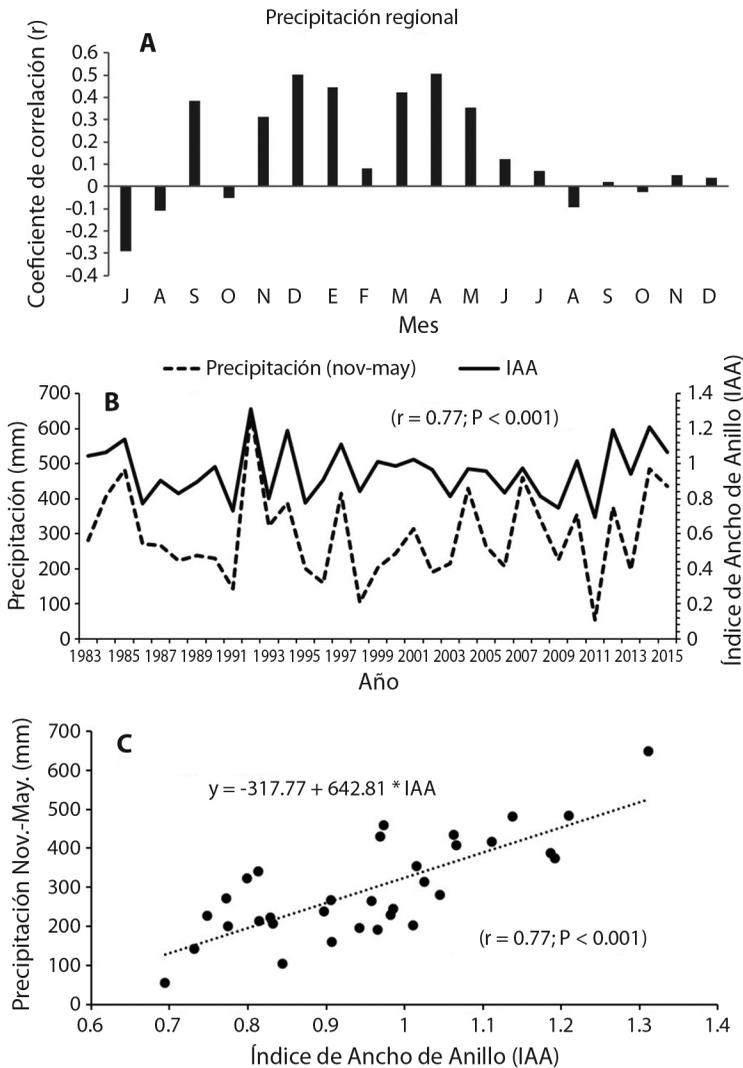
(“Subsample Signal Strength”, por sus siglas en inglés) (Wigley, Briffa, & Jones, 1984) con un valor umbral de 0.85 para evaluar el intervalo de tiempo más confiable de la cronología. El resultado de este análisis indicó que el periodo apropiado para realizar la reconstrucción es de 1711 a 2017 (307 años), con 46 muestras provenientes de 23 árboles. Sin embargo, antes de aceptar el periodo sugerido por el análisis, se verificó qué tanto variaba el ancho de los anillos en el periodo previo respecto al sugerido. Así, se evidenció que la desviación estándar del periodo 1550-1710 (0.2229) y de 1711-2017 (0.2150) indica una similitud en su variación interanual que permitió utilizar un periodo más amplio de la cronología desarrollada con fines de reconstrucción (1550-2017, 468 años, con 79 muestras de 40 árboles). De esta manera, se pudo verificar la variabilidad de la precipitación en el periodo que posee un tamaño de muestra menor (Fig. 1).

**Respuesta climática:** Con base en la relación entre los índices de crecimiento y los



**Fig. 1.** Cronología de anillo total de *Taxodium mucronatum* 1474-2017 (544 años), río Sabinas, Reserva de la Biosfera El Cielo, México. La línea gris indica la variabilidad interanual de la precipitación (de alta frecuencia), la línea negra representa la variabilidad de la precipitación en décadas (de baja frecuencia “spline”) y la línea quebrada muestra el número de núcleos de crecimiento que se analizaron por año.

**Fig. 1.** Total ring chronology of *Taxodium mucronatum* 1474-2017 (544 years), Sabinas River, El Cielo Biosphere Reserve, Mexico. The gray line indicates the interannual variability of precipitation (high frequency), the black line represents the variability of precipitation in decades (low frequency “spline”) and the broken line shows the number of growth nuclei that were analyzed by year.



**Fig. 2.** Respuesta climática de *Taxodium mucronatum*. (A) Coeficiente de correlación entre el índice de anillo total y la precipitación regional (1983-2015). (B) Relación entre la precipitación noviembre-mayo (mejor correlación) y el índice de anillo total. (C) Dispersión del modelo de regresión para reconstruir la precipitación.

**Fig. 2.** Climatic response of *Taxodium mucronatum*. (A) Correlation coefficient between the total ring index and regional precipitation (1983-2015). (B) Relationship between November-May precipitation (best correlation) and total ring index. (C) Dispersion of the regression model to reconstruct precipitation.

registros de precipitación media regional de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio en el periodo común de 1983 a 2015 (33 años) se logró identificar a qué periodo de precipitación responde el crecimiento de *T. mucronatum* (Fig. 2A). Del análisis de correlación entre los índices dendrocronológicos y el de la precipitación regional se determinó que el periodo de crecimiento con mejor correlación

( $R = 0.77$ ,  $P < 0.001$ ) corresponde a noviembre-mayo, la estación invierno-primavera (Fig. 2B). Esto a su vez indicó un buen potencial para desarrollar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la precipitación en la longitud total de la cronología (Fig. 2C).

**Calibración y verificación:** Con base en la serie de datos climáticos 1983-2015, se

TABLA 1  
Calibración del modelo para la reconstrucción de la precipitación

Periodos	R <sup>2</sup>	Coeficientes		Error estándar		Prueba de t		Probabilidad	
		a	b	a	b	a	b	a	b
1983-1999	0.63	-357.83	678.16	122.69	126.12	-2.91	5.37	0.010	0.000
2000-2015	0.47	-266.46	595.67	149.44	155.66	-1.78	3.82	0.096	0.001
1983-2015	0.58	-317.76	642.80	92.40	95.59	-3.43	6.72	0.001	0.000

TABLA 2  
Verificación del modelo para la reconstrucción de la precipitación

Periodo	Correlación Pearson	Reducción del Error	Valor de (t)	Prueba de signos	Primera diferencia significativa
1983-1999	0.81*	0.65*	2.38*	4*	3*
2000-2015	0.71*	0.50*	2.11*	3*	1*

\* P < 0.05.

realizó el proceso de calibración en el periodo de 2000-2015, mientras que el de verificación fue de 1983-1999. Para la calibración se obtuvo una correlación positiva de  $R = 0.71$  ( $R^2 = 0.47$ ,  $P < 0.001$ ); donde, además, el coeficiente de determinación explicó un 47 % de la variabilidad climática. En tanto que, en el periodo de verificación, se obtuvo una correlación positiva de  $R = 0.81$  ( $R^2 = 0.63$ ,  $P < 0.001$ ); donde el modelo explica un 63 % de la variabilidad de la precipitación (Tabla 1, Tabla 2).

La subrutina VERIFY del DLP, evidenció que tanto la calibración como la verificación pasaron la prueba de significancia ( $P < 0.05$ ) para la correlación, reducción de error, valor de "t" y primera diferencia significativa (Tabla 1, Tabla 2). Por lo tanto, el modelo de regresión obtenido para el periodo 1983-2015 se consideró estadísticamente válido para reconstruir el periodo total de la cronología (Fig. 3).

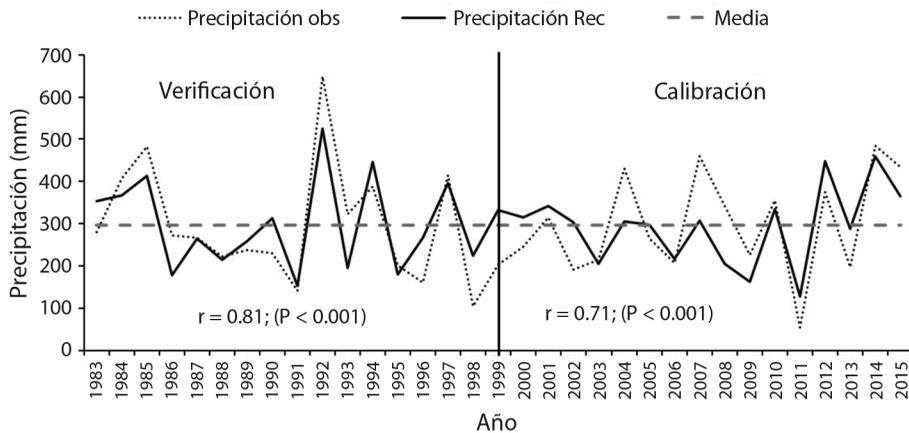
### Reconstrucción de la precipitación:

La reconstrucción de la precipitación para la Reserva de la Biosfera El Cielo tiene una extensión de 468 años (1550-2017); indica una

variabilidad hidroclimática histórica alta, con evidencia de sequías y lluvias extremas durante los últimos 4 siglos en la región. El patrón de precipitación histórica resalta la presencia de sequías a principios y finales de cada siglo, con el registro de sequías extremas cada 50 años (Fig. 4, Fig. 5, Tabla 3).

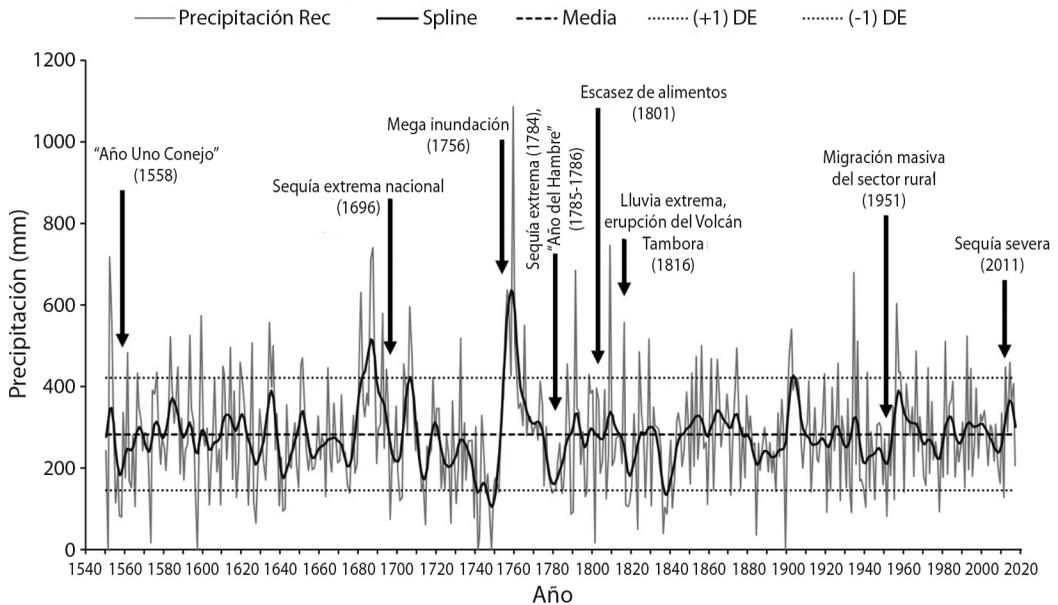
## DISCUSIÓN

La sensibilidad de *T. mucronatum* a la variación de la precipitación pluvial en la Reserva de la Biosfera El Cielo, es consistente con los estudios antecedentes sobre el potencial dendroclimático de la especie. Particularmente se destaca la respuesta positiva del crecimiento de los árboles a la lluvia estacional de invierno-primavera. Tal como se ha documentado en el norte de México, diversos estudios en esta región del país coinciden en que la respuesta positiva se debe principalmente a la presencia de lluvias que se consideran de baja intensidad pero que son de larga duración en el invierno. Esto aunado al periodo de evaporación baja, permiten que la humedad se almacene



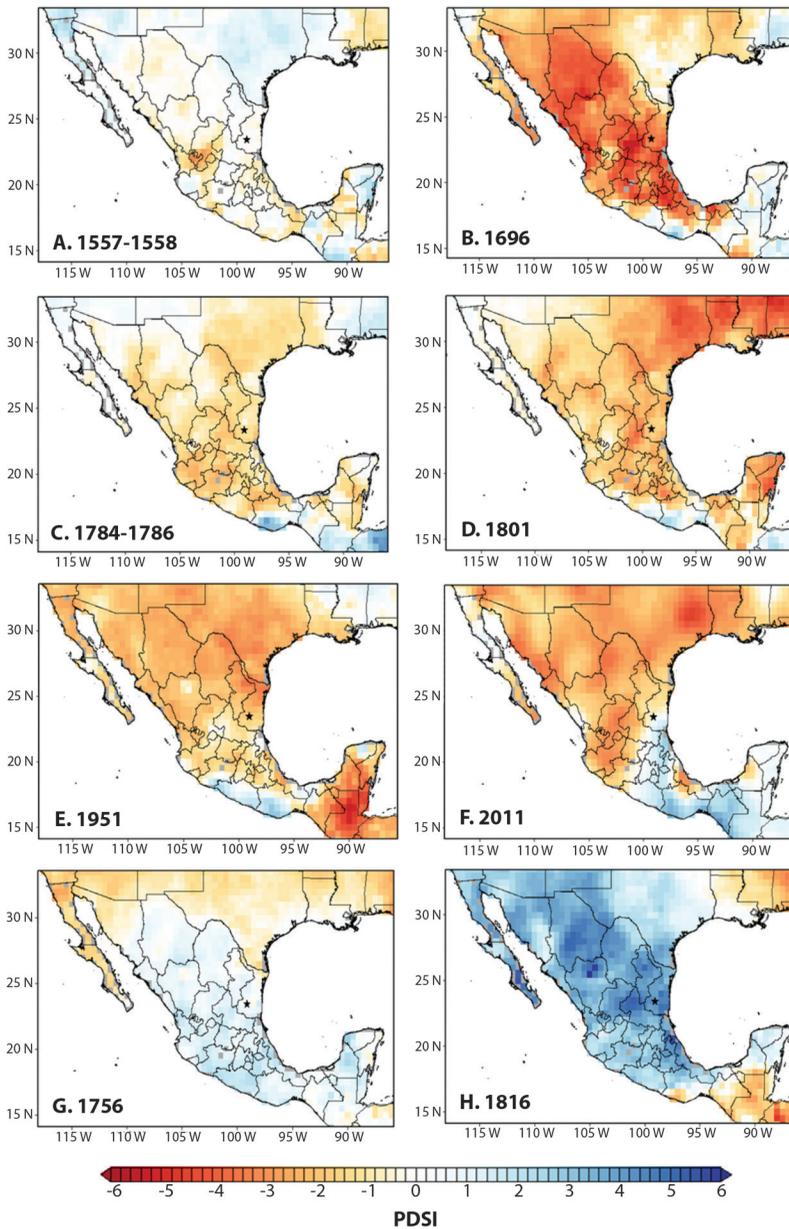
**Fig. 3.** Comparación entre la precipitación observada (línea punteada) y la precipitación reconstruida (línea continua) invierno-primavera (noviembre-mayo) en el periodo 1983-2015 (33 años). Este periodo se dividió para realizar dos pruebas estadísticas, una de calibración (2000-2015) y una de verificación (1983-1999).

**Fig. 3.** Comparison between the observed (dotted line) and reconstructed (solid line) winter-spring (November-May) precipitation in the 1983-2015 period (33 years). This period was divided to conduct two statistical tests, one for calibration (2000-2015) and one for verification (1983-1999).



**Fig. 4.** Reconstrucción de la precipitación de los últimos 468 años (noviembre-mayo, 1550-2017) en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México. La línea gris indica la variabilidad de frecuencia alta de la precipitación (anual), la línea negra indica la variabilidad de la precipitación en décadas (de baja frecuencia “spline”), la línea discontinua representa la precipitación media reconstruida, mientras que las líneas punteadas por arriba y por debajo de la media marcan una desviación estándar (DE) e indican lluvia o sequía extrema, respectivamente.

**Fig. 4.** Reconstruction of the precipitation of the last 468 years (November-May, 1550-2017) at El Cielo Biosphere Reserve, Mexico. The gray line indicates the precipitation high frequency variability (annual), the black line indicates the precipitation variability in decades (low frequency “spline”), the dashed line represents the reconstructed average precipitation, while the dotted lines above and below the mean mark one standard deviation and indicate extreme rain or drought, respectively.



**Fig. 5.** Condiciones de sequía o humedad en México según el *Mexican Drought Atlas*: PDSI (Índice de Sequía Severa de Palmer: junio, julio y agosto). Los valores -6 (color rojo) y 6 (color azul) indican sequía o humedad extrema, respectivamente (Stahle et al., 2016). Se muestran los años con (A-F) menor y (G-H) mayor precipitación. La Reserva de la Biosfera El Cielo se indica con una estrella negra. Los mapas verifican la calidad de la reconstrucción histórica de la precipitación para el área de estudio.

**Fig. 5.** Drought or humidity conditions in Mexico according to the *Mexican Drought Atlas*: PDSI (Severe Drought Index of Palmer: June, July and August). The values -6 (red color) and 6 (blue color) indicate extreme drought or humidity, respectively (Stahle et al., 2016). Years with (A-F) the lowest and (G-H) highest rainfall are shown. El Cielo Biosphere Reserve is indicated with a black star. The maps verify the quality of the historical precipitation reconstruction for the study area.

TABLA 3  
Años con sequía o lluvia extrema detectados en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México (1550-2017)

TABLE 3  
Years with extreme drought or rain detected in El Cielo Biosphere Reserve, Mexico (1550-2017)

Siglo	Sequía extrema	Lluvia extrema	Fuente
XVI	1551, 1555, 1557-1558, 1565, 1573, 1597	1552-1553, 1561, 1566, 1576, 1583, 1587, 1593, 1599	[15, 1, 34, 31, 13, 28, 29, 6, 22]
XVII	1603, 1609, 1617, 1623, 1626-1627, 1639, 1641-1642, 1663, 1675, 1696	1606, 1610-1611, 1614, 1619, 1625, 1634, 1636, 1650-1651, 1664, 1680-1681, 1686-1688, 1692, 1694	[32, 13, 33, 31, 22]
XVIII	1701-1702, 1712, 1714, 1727, 1730, 1739, 1741-1742, 1745, 1747-1748, 1752, 1779-1780, 1784, 1787, 1789-1790, 1796-1798	1703, 1706-1707, 1718, 1732, 1755-1760, 1765, 1787, 1791, 1798	[32, 33, 13, 5, 32, 6, 14, 29, 12, 3, 8, 31, 22, 33, 30, 36, 34, 17]
XIX	1801, 1807, 1817-1819, 1823, 1827, 1830, 1836-1838, 1841, 1859, 1871, 1884, 1894, 1899	1809, 1816, 1824, 1829, 1851, 1853, 1856, 1861, 1864, 1874	[3, 32, 22, 15, 13, 5, 11, 31, 6, 23]
XX	1912, 1920, 1927, 1932-1933, 1940, 1945, 1951, 1955, 1960, 1978,	1901-1902, 1919, 1926, 1934, 1936, 1941, 1956-1958, 1966, 1972, 1981, 1992, 1994	[32, 31, 6, 13, 22, 20, 21, 7, 16, 31, 4, 17, 2]
XXI	2011	2012, 2014	[10, 19, 9, 18, 24, 25, 26, 27]

[1] Acuña-Soto, Stahle, Cleaveland, & Therrell, 2002; [2] Astudillo-Sánchez, Villanueva-Díaz, Endara-Agramont, Nava-Bernal, & Gómez-Albores, 2017; [3] Cerano, 2004; [4] Cerano, Villanueva, Fulé, Arreola, Sánchez, & Valdez, 2009; [5] Cerano, Villanueva, Valdez, Cornejo, Sánchez, & Constante, 2011a; [6] Cerano, Villanueva, Valdez, Méndez, & Constante, 2011b; [7] Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva, & Burns, 2003; [8] Constante, Villanueva, Cerano, Cornejo, & Valencia, 2009; [9] CONAGUA, 2012; [10] DOF, 2012; [11] Escobar-Ohmstede, 1997; [12] Domínguez, 2016; [13] Florescano, 1980; [14] Florescano, 1986; [15] García, 1993; [16] Grissino-Mayer, 1995; [17] Herrera, Vera, & Martínez, 2015a,b; [18] Ortega-Gaucin & Velasco, 2013; [19] SAGARPA, 2012; [20] Stahle & Cleaveland, 1988; [21] Stahle, Cleaveland, Therrell, & Villanueva, 1999; [22] Stahle et al., 2016; [23] Stothers, 1984; [24] SMN, 2011; [25] SMN, 2012; [26] SMN, 2014; [27] SMN, 2017; [28] Therrell, Stahle, & Acuña-Soto, 2004 [29] Therrell, Stahle, Villanueva, Cornejo, & Cleaveland, 2006; [30] Villanueva et al., 2005; [31] Villanueva et al., 2007a; [32] Villanueva et al., 2007b; [33] Villanueva, Fulé, Cerano, Estrada, & Sánchez, 2009; [34] Villanueva et al., 2010a; [35] Villanueva et al., 2011; [36] Villanueva et al., 2015.

en el perfil del suelo, y se mantenga disponible al inicio de la estación de crecimiento (Stahle et al., 1999; Diaz, Therrell, Stahle, & Cleaveland, 2002; Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva, & Burns, 2003; Constante et al., 2009; Cerano, Cornejo, & Valencia, 2009; Cerano et al., 2011b).

La lluvia asume una importancia crítica en el desarrollo socioeconómico de México, donde a través del tiempo se ha evidenciado la influencia que tiene este elemento climático en la producción agrícola y pecuaria, así como el agua disponible para el consumo humano. Debido a que las sequías han tenido un mayor impacto socioeconómico en el país, existe un mayor número de registros históricos que documentan estos hechos climáticos. Sin

embargo, cuando fue posible, también se evidenciaron algunos acontecimientos históricos de lluvia extrema. Estos datos históricos en combinación con la información dendroclimática de otras especies de coníferas en la región, y el “Mexican Drought Atlas” (Stahle et al., 2016), validaron la reconstrucción histórica de la precipitación en el área de estudio. La cual se aborda a través de los años o periodos con acontecimientos históricos de mayor impacto (Fig. 4; Tabla 3; Fig. 5).

**Precipitación reconstruida para el siglo XVI:** El registro histórico de Tamaulipas en este periodo es escaso. Sin embargo, los existentes para la región centro de México están bien documentados. Así se sabe que la cultura

Azteca registró una sequía extrema en 1558; en concordancia con el inicio del “Año Uno Conejo” que sucede cada 52 años. Este año del calendario Azteca está estrechamente relacionado con la presencia de eventos catastróficos; y entre ellos, destaca la relación sequía-hambre (Therrell et al., 2004). La sequía extrema de 1558 fue consistente con el crecimiento reducido de *T. mucronatum* en la Reserva de la Biosfera El Cielo y es posible que esta respuesta se haya agudizado por las condiciones previas de sequedad de 1557, de las cuales se tiene testimonio en el Valle de México e incluso en Oaxaca (García, Pérez, & Molina, 2003). Por lo tanto, se advierte que estos eventos no fueron un hecho aislado en la región centro del país, sino que su severidad fue tan fuerte que se extendió tanto en el norte como el sur del territorio mexicano (Fig. 4, Fig. 5A).

Los registros históricos de lluvias extremas en el país no destacan en importancia tanto como el de las sequías. Sin embargo, durante este siglo se tiene registrado un episodio de lluvias abundantes durante los años 1550-1556 (Stahle et al., 2016), dentro de los cuales en esta reconstrucción destacan los años 1552 y 1553 como los más húmedos, y es posible que en 1552 se recibiera la mayor cantidad de lluvia en la región (Fig. 4); pues de este año, existen registros históricos de lluvias excesivas que causaron inundaciones y la pérdida de cultivos en la región centro del país y también en el estado de Veracruz, el cual colinda con el sureste de Tamaulipas (García et al., 2003). Desafortunadamente, no se cuenta con documentos históricos ni códices que registren una inundación importante en Tamaulipas, pues esta entidad es relativamente joven, comparada con los estados del centro del país.

**Precipitación reconstruida para el siglo XVII:** En las décadas de 1630 y 1640 la reconstrucción coincide con los periodos secos de los registros dendroclimáticos de Villanueva et al. (2007a) que marcan sequía del periodo 1638-1649 (aquí destaca 1639 y el periodo 1641-1642). Además, esta reconstrucción evidencia una de las sequías más severas para este

siglo ocurrida en 1696 (Fig. 4, Fig. 5B), la cual es consistente con el registro de otras series dendroclimáticas procedentes del noreste de México como el abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) del estado de Nuevo León (Villanueva et al., 2007b). En cuanto a las lluvias extremas, se tiene conocimiento de lluvias intensas que fueron captadas en el crecimiento positivo de los árboles utilizados en diversas reconstrucciones dendroclimáticas en México. Estas reconstrucciones muestran lluvias extraordinarias en los periodos 1607-1610 y 1618-1621 (Stahle et al., 2016), en el sitio de estudio destacaron particularmente los años 1610 y 1619 con lluvias extremas.

**Precipitación reconstruida para el siglo XVIII:** Uno de los periodos secos más fuertes de la reconstrucción se presentó durante la década de 1740 dentro de los cuales destacaron por su severidad, los años 1741-1742, y 1748. La presencia de sequías en estos años se puede verificar a través de la reconstrucción de precipitación invierno-primavera en el estado de Coahuila (Cerano, 2004; Constante et al., 2009) con árboles de *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus cembroides* respectivamente. También con una reconstrucción estacional procedente del estado de Nuevo León donde se usaron árboles de *P. menziesii* (Villanueva et al., 2007b).

Los documentos históricos señalan que el periodo 1785-1786 fue una de las sequías más severas en México que abarcó la mayor parte del territorio nacional y recibió el nombre del “Año del Hambre” puesto que produjo una crisis generalizada por la falta de alimentos (Florescano, 1980). En esta reconstrucción, estos años no resultaron en sequía extrema considerando que los valores de precipitación no cumplieron el criterio de una desviación estándar por debajo de la media. Sin embargo, los valores de precipitación del año 1785 (155.11 mm) y 1786 (164.23 mm) son menores que la media de precipitación reconstruida (282 mm), por lo que se puede inferir que en esta región el “Año del Hambre”, también se presentó, aunque la anualidad más seca ocurrió un año antes (1784) (Fig. 4, Fig. 5C). Este año seco es consistente

con la falta de lluvia registrada en otras reconstrucciones dendroclimáticas del noreste de México (Villanueva et al., 2007b; Constante et al., 2009; Villanueva et al. 2015). Las lluvias extremas se presentaron de manera prolongada durante el periodo de 1755 a 1760; dentro de este periodo, un estudio histórico de Tamaulipas destaca una inundación importante en 1756 (Fig. 4 y Fig. 5G). En el área de influencia de la Reserva de la Biosfera El Cielo, la cual trajo consigo el desbordamiento de los tres ríos principales de la región (Río Guayalejo, Río Frío y Río Sabinas) ocasionando pérdidas cuantiosas en el sector agrícola y pecuario, entre ellos la pérdida de ganado que fue arrastrado por la corriente (Herrera et al., 2015a).

**Precipitación reconstruida para el siglo XIX:** Durante la primera mitad de este siglo destaca la sequía que ocurrió en 1801 (Fig. 4, Fig. 5D); en este año se tiene documentado que, en Saltillo, Coahuila, se presentó un brote de plaga (langosta) y hongos (chahuixtle) en el periodo 1801-1802. Aunado a las sequías severas que agudizaron de forma grave la situación, entre el otoño de 1801 y finales de 1802, la escasez de cultivos se extendió más allá de Nuevo León, provocando que el precio de los granos de primera necesidad, principalmente harinas, elevaran considerablemente su costo (Cerano, 2004). La segunda sequía de gran intensidad se produjo en 1807, Cerano (2004) señala a este año como una de las sequías más severas que impactó Saltillo, Coahuila, provocando carestía ante la escasez de semillas, principalmente de maíz. La historia señala que tales condiciones climáticas adversas ocasionaron tantos problemas agrícolas, escasez de alimentos, problemas políticos, y el consecuente descontento del pueblo que, en conjunto, pudieron dar pie al inicio de la Guerra de Independencia de México, la cual estalló en septiembre de 1810.

La reconstrucción de la precipitación en la RBC guarda similitud a nivel nacional con una reconstrucción dendroclimática que indica lluvia abundante entre 1814-1817 (Stahle et al., 2016). En congruencia con este periodo, esta reconstrucción destaca como año de lluvia

extrema a 1816 (Fig. 4, Fig. 5H). Este año con precipitación anómala, incluso pudo haber sido consecuencia del efecto climático mundial que ocasionó la erupción del Volcán Tambora en Indonesia, la erupción volcánica más grande registrada en la historia (Stothers, 1984).

**Precipitación reconstruida para el siglo XX:** Diversas reconstrucciones dendroclimáticas del noreste de México convergen en señalar la presencia de sequías a principios de este siglo (Villanueva et al., 2007a; Villanueva et al., 2007b; Cerano et al., 2011b; Stahle et al., 2016). Cabe destacar que si bien en esta reconstrucción los años 1907, 1908 y 1909 no resultaron con sequía extrema, los valores de precipitación que registran están por debajo de la media, o apenas por encima de ella en 1909. Por lo que se puede inferir, que los acontecimientos climáticos adversos durante este periodo fueron los mismos que provocaron el descontento de la población mexicana que al ver la pobreza y falta de alimento en todo el país, se pronunciaron a favor de la Revolución Mexicana en 1910.

En la segunda mitad del siglo, la reconstrucción de precipitación concuerda con uno de los regímenes de sequía mejor documentados en la historia de México, la cual pudo haber sido la sequía más extrema en el noreste del país por su impacto social y económico. Ocasiónó uno de los fenómenos de migración masiva del sector rural tanto a las ciudades del centro de México como hacia los Estados Unidos, este periodo se extiende de 1951-1957 e incluso hasta la década de 1960 (Florescano, 1980; Stahle et al., 2016). Dentro de este periodo la reconstrucción de este estudio evidencia las sequías de mayor impacto en la zona durante 1951, 1955 y 1960 (Fig. 4, Fig. 5E).

**Precipitación reconstruida para el siglo XXI:** La última sequía extrema registrada para la Reserva de la Biosfera El Cielo, se presentó a inicios de la segunda década de este siglo en el 2011 (Fig. 4, Fig. 5F), siendo la peor sequía en los estados del norte y centro de México (DOF, 2012; SAGARPA, 2012; CONAGUA, 2012;

Ortega-Gaucin & Velasco, 2013). De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional, como resultado de las precipitaciones escasas que se presentaron desde octubre 2010 hasta junio 2011, la sequía se incrementó gradualmente; en noviembre 2010 el 12.2 % de la superficie total del país padecía los efectos de algún tipo de sequía (desde sequía moderada hasta sequía extrema), y para junio 2011 esta superficie se incrementó significativamente hasta cubrir cerca del 86 % del territorio nacional, decretando así, el 2011 como el décimo tercer año más seco en la historia de México desde los últimos 70 años (SMN, 2011).

**Implicaciones:** De seguir este patrón de sequías en la región, es probable que tanto en la Reserva de la Biosfera El Cielo, como en su área de influencia, se presenten sequías extremas a mediados y finales del siglo XXI. Estas sequías podrían tener una frecuencia mayor, si se considera el calentamiento actual del planeta a consecuencia de las actividades humanas. Finalmente, cabe mencionar los problemas que traería consigo la presencia de eventos climáticos extremos en la Reserva de la Biosfera El Cielo y su zona de influencia, entre los cuales destacan los daños por sequía al sector agrícola de la región. Como la pérdida del cultivo de maíz, caña de azúcar y cítricos. Por otra parte, también se vería afectado el sector pecuario, por ejemplo, la pérdida de cabezas de ganado. El sector turístico en esta región, principalmente en la Reserva de la Biosfera El Cielo, también sufriría los daños que pudieran ocasionar las sequías y lluvias severas en los años venideros. Porque las poblaciones de flora y fauna silvestre presentes en el área de estudio que son el atractivo principal de la reserva, también se verían afectados. Este trabajo es una base de información fidedigna acerca de la variabilidad histórica del clima en la región que puede ser de utilidad en el diseño de las estrategias de prevención, mitigación y adaptación del sector productivo, forestal, turístico y de conservación de la flora y fauna silvestre de la Reserva de la Biosfera El Cielo y su área de influencia. Además, debido al impacto histórico que han

tenido las sequías extremas en la región, la reconstrucción de precipitación presentada en este estudio tendría también un valor especial en el uso y manejo del agua, recurso de por sí limitado en el estado de Tamaulipas.

**Declaración de ética:** los autores declaran que todos están de acuerdo con esta publicación y que han hecho aportes que justifican su autoría; que no hay conflicto de interés de ningún tipo; y que han cumplido con todos los requisitos y procedimientos éticos y legales pertinentes. Todas las fuentes de financiamiento se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Tamaulipas a través del Programa de Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por financiar el proyecto: Reconstrucción histórica de la precipitación en la Reserva de la Biosfera el Cielo con *Taxodium mucronatum* Ten. (PRODEP: 511-6/18-9249). También extendemos gratitud a nuestros ayudantes de campo por su valiosa colaboración para el desarrollo de este proyecto.

## RESUMEN

**Introducción:** El conocimiento histórico del clima es fundamental para analizar su variabilidad en el tiempo y su impacto en los ecosistemas y poblaciones humanas. **Objetivo:** Analizar el crecimiento anual de los árboles de sabino, también conocido como ahuehuate (*Taxodium mucronatum*) del río Sabinas para reconstruir la variabilidad de precipitación histórica en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. **Métodos:** Se fecharon los crecimientos anuales de 116 muestras de sabino, a partir de las cuales se desarrolló una cronología de 544 años (1474-2017). El periodo que sustentó un número de muestras adecuado para el análisis climático se extiende de 1550 a 2017 (468 años). **Resultados:** Con base en el análisis de función respuesta se determinó que la precipitación de invierno-primavera (noviembre-mayo) influyó de manera significativa en el crecimiento de los sabinos en el área de estudio ( $r=0.77$ ,  $P < 0.001$ ). La reconstrucción registró

una variabilidad climática alta a nivel interanual y entre décadas, en la cual, se identificó la presencia de sequías a principios y finales de cada siglo, así como la presencia de sequías extremas cíclicas cada 50 años. Estas sequías destacaron por su impacto social y económico a nivel nacional y regional. Las sequías más importantes son el “Año Uno Conejo” de acuerdo con el calendario Azteca, en 1558; la sequía del 1696 con un impacto fuerte en el noreste de México; “El Año del Hambre” en 1785-1786, en la Reserva de la Biosfera El Cielo desde 1784; la sequía de 1801 que trajo consigo la escasez de alimentos; la de 1951 dentro del periodo de “Migración masiva del sector rural”; y la sequía más reciente, registrada en 2011. Las lluvias extremas más representativas sucedieron en 1756 y 1816. **Conclusiones:** De seguir el patrón de precipitación registrado en la Reserva de la Biosfera El Cielo, es posible esperar la presencia de sequías extremas a mediados y finales del siglo XXI.

**Palabras clave:** anillos de árboles; bosque de galería; noreste de México; sequías; lluvias; variabilidad climática; dendrocronología.

## REFERENCIAS

- Acuña-Soto, R., Stahle, D.W., Cleaveland, M.K., & Therrell, M.D. (2002). Megadrought and megadeath in 16th century México. *Emerging Infectious Diseases*, 8, 360-362.
- Astudillo-Sánchez, C.C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A.R., Nava-Bernal, G.E., & Gómez-Albores, M.A. (2017). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees*, 31, 441-453.
- Cerano, J. (2004). *Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Antonio Narro, Coahuila, México.
- Cerano, J., Villanueva, J., Fulé, P.Z., Arreola, J.G., Sánchez, I., & Valdez, R.D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44.
- Cerano, J., Villanueva, J., Valdez, R.D., Cornejo, E.H., Sánchez, I., & Constante, V. (2011a). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 33-46.
- Cerano, J., Villanueva, J., Valdez, D.R., Méndez, J., & Constante, V. (2011b). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 235-249.
- Cleveland, K.M., Stahle, D.W., Therrell, M.D., Villanueva, J., & Burns, T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369-388.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2012). *Análisis espacial de las regiones más vulnerables ante las sequías en México* (Reporte técnico). México: SEMARNAT.
- Constante, V., Villanueva, J., Cerano, J., Cornejo, E.H., & Valencia, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17-39.
- Cook, E.R., & Peters, K. (1981). The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41, 45-53.
- Cook, E.R., & Holmes, R.H. (1984). *Program ARSTAN and user's manual Laboratory of Tree-Ring Research* (Software). Arizona, USA: University of Arizona.
- Cook, E.R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37-59.
- Díaz, C.S., Therrell, M.D., Stahle, D.W., & Cleaveland, M.K. (2002). Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree rings, 1647-1992. *Climate Research*, 22(3), 237-244.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2012). *Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas* (Reporte Técnico). Recuperado de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012)
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 77-93.
- Escobar-Ohmstede, A. (1997). Las sequías y sus impactos en la sociedad del México decimonónico, 1856-1900. En A.V. García (Ed.), *Historia y Desastres en América Latina* (Volumen II). México: LA RED.
- Florescano, M.E. (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*. México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).
- Florescano, M.E. (1986). *Precios del Maíz y Crisis Agrícolas en México: 1708-1810*. México: Ediciones Era.
- Fritts, H.C. (1976). *Tree Ring and Climate*. Arizona, USA: Academic Press.
- Fritts, H.C. (1991). *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. Arizona, USA: University of Arizona Press.
- García, V. (1993). Las sequías históricas de México. *Desastres y Sociedad*, 1(1), 83-97.

- García, V., Pérez, J.M., & Molina, A. (2003). *Desastres Agrícolas en México. Catálogo Histórico. Tomo I. Épocas prehispánicas y colonial (958-1822)*. México: FCE-CIESAS.
- Gobierno del Estado de Tamaulipas-Instituto de Ecología Aplicada-UAT. (2013). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera El Cielo*. Tamaulipas, México: Gobierno del Estado de Tamaulipas-Instituto de Ecología Aplicada-UAT.
- González-Medrano, F. (2005). La vegetación. En G. Sánchez-Ramos, P. Reyes-Castillo, & R. Dirzo (Eds.), *Historia Natural de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México* (pp.88-105). Ciudad Victoria, México: Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Grissino-Mayer, H.D. (1995). *Tree-ring reconstruction of climate and fire history at El Malpais National Monument, New Mexico*. Arizona, USA: University of Arizona Press.
- Herrera, O., Vera, R., & Martínez, E. (2015a). *Tamaulipas a través de sus regiones y municipios* (Tomo VII). Ciudad Victoria: México: Gobierno del Estado de Tamaulipas.
- Herrera, O., Vera, R., & Martínez, E. (2015b). *Tamaulipas a través de sus regiones y municipios* (Tomo VIII). Ciudad Victoria, México: Gobierno del Estado de Tamaulipas.
- Holmes, R.L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2000). *Diccionario de datos climáticos* (Base de datos, Escalas 1:250 000 y 1:1 000 000). México: Gobierno de México.
- Mora-Olivo, A., & Novelo-Retana, A. (2005). La vegetación acuática y semiacuática. En G. Sánchez-Ramos, P. Reyes-Castillo, & R. Dirzo (Eds.), *Historia Natural de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México* (pp. 106-115). Ciudad Victoria, México: Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Ortega-Gaucin, D., & Velasco, I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-LAC*, 5(2), 78-90.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2012). *Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON)*. México: Gobierno de México. Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2011). *Seguimiento mensual de afectación por sequía* (Base de datos). Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2012). *Reporte del clima en México* (Base de datos). Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2014). *Reporte del clima en México* (Base de datos). Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2017). *Reporte del clima en México* (Base de datos). Recuperado de <http://smn.cna.gob.mx>
- Stahle, D.W., & Cleaveland, M.K. (1988). Texas drought history reconstructed and analyzed from 1698 to 1980. *American Meteorological Society*, 1, 59-74.
- Stahle, D.W., Cleaveland, M.K., Therrell, M.D., & Villanueva, J. (1999). Tree-ring reconstruction of winter and summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years. In *10th Conference of Global Change Studies* (pp. 205-211). Dallas, Texas USA: American Meteorological Society.
- Stahle, D.W., Villanueva, J., Burnette, J., Cerano, J., Heim, R.R. Jr., Fye, F.K., Acuña-Soto, R., Therrell, M.D., Cleaveland, M.K., & Stahle, D.K. (2011a). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38, 1-4.
- Stahle, D.W., Burnette, D.J., Villanueva, J., Heim, R.R. Jr., Fye, F.K., Cerano, J., Acuña-Soto, R., & Cleaveland, M.K. (2011b). Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics* 39(6), 1431-1446.
- Stahle, D.W., Burnette, D.J., Villanueva, J., Cerano, J., Fye, F.K., Griffin, R.D., Cleaveland, M.K., Stahle, D.K., & Wolff, K.P. (2012). Tree-ring analysis of ancient baldcypress trees and subfossil wood. *Quaternary Science Reviews*, 34, 1-15.
- Stahle, D.W., Cook, E.R., Burnette, D.J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J.N., Griffin, D., Cook, B.I., Acuña-Soto, R., Torbenson, M.C.A., Szejner, P., & Howard, I.M. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34-60.
- Stokes M.A., & Smiley, T.L. (1968). *An introduction to Tree-Ring Dating*. Arizona, USA: University of Arizona Press.
- Stothers, R.B. (1984). The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath. *Science*, 224(4654), 1191-1198.
- Therrell, M.D., Stahle, D.W., & Acuña-Soto, R. (2004). Aztec drought and the "curse of one rabbit". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(9), 1263-1272.
- Therrell, M.D., Stahle, D.W., Villanueva, J., Cornejo, E.H., & Cleaveland, M.K. (2006). Tree-ring reconstructed

- maize yield in central Mexico: 1474-2001. *Climatic Change*, 74(4), 493-504.
- Villanueva, J., Luckman, B.H., Stahle, D.W., Therrell, M.D., Cleveland, M.K., Cerano, J., Gutiérrez, G., Estrada, J., & Jasso, R. (2005). Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: Water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, Mexico. *Dendrochronologia*, 22(3), 215-223.
- Villanueva, J., Stahle, D.W., Luckman, B.H., Cerano, J., Therrell, M.D., Morán, R., & Cleaveland, M.K. (2007a). Potencial dendrocronológico de *Taxodium mucronatum* Ten. y acciones para su conservación en México. *Ciencia Forestal en México*, 32(101), 101-148.
- Villanueva, J., Stahle, D.W., Luckman, B.H., Cerano, J., Therrell, M.D., Cleaveland, M.K., & Cornejo, E. (2007b). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1-2), 117-131.
- Villanueva, J., Fulé, P.Z., Cerano, J., Estrada, J., & Sánchez, I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia forestal en México*, 34(105), 37-69.
- Villanueva, J., Cerano, J., Stahle, D.W., Constante, V., Vázquez, L., Estrada, J., & Benavides, J. de Dios. (2010a). Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 7-30.
- Villanueva, J., Cerano, J., Estrada, J., Morán, R., & Constante, V. (2010b). Precipitación y gasto reconstruido en la cuenca baja del río Nazas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 25-37.
- Villanueva, J., Cerano, J., Stahle, D.W., Luckman, B.H., Therrell, M.D., Cleaveland, M.K., & Fulé, P.Z. (2011). La dendrocronología y reconstrucciones paleoclimáticas en el Norte-Centro de México. En M. Caballero, & B. Ortega (Eds.), *Escenarios de Cambio Climático: Registros del Cuaternario en América Latina* (pp. 47-72). México: UNAM-Instituto de Geofísica, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial.
- Villanueva, J., Cerano, J., Vázquez, L., Stahle, D.W., Fulé, P., Yocom, L., Franco, O., & Ruiz, J.A. (2015). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía*, 86, 5-14.
- Wigley, T., Briffa, K.R., & Jones, P.D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology Climatic*, 23, 201-213.