

RECONSTRUCCIÓN DE PRECIPITACIÓN ESTACIONAL DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco EN SIERRA LA MADERA, CUATROCIÉNEGAS, COAHUILA

José Villanueva Díaz¹, Julián Cerano Paredes¹
y Juan Estrada Ávalos¹

RESUMEN

Con el objetivo de determinar la variabilidad hidroclimática histórica y el impacto de patrones circulatorios en la región de Cuatrociénegas, Coahuila, la cual está sujeta a extrema presión social por el uso del agua, se generaron dos cronologías climáticamente sensibles de *Pseudotsuga menziesii* en Sierra La Madera. La cronología de madera temprana respondió a la precipitación estacional acumulada del período enero-junio. La reconstrucción que se extiende de 1719 a 2003 indica la presencia de sequías extremas en períodos recurrentes aproximados de 50 años; es decir 1740-50, 1790, 1860, 1890-1900, 1950 y 1990. La desecación del período reciente (1990-2003) todavía persiste para Cuatrociénegas, a diferencia de la extracción de agua que se ha incrementado de forma sustancial y en este sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad acuática y subacuática. El efecto de patrones de circulación atmosférica global como es el caso de El Niño Oscilación del Sur, en la precipitación de esta región, ha sido variable en el tiempo. La influencia de fenómenos atmosféricos que afectan grandes regiones del noreste de México impactan de igual manera esta región, ya que sequías reconstruidas para Saltillo, sureste del estado de Coahuila y parte sur de Nuevo León, también afectaron la planicie de Cuatrociénegas. El desarrollo de una red dendrocronológica regional permitirá expandir en el tiempo la información hidroclimática de esta zona, fundamental para el manejo sustentable de sus recursos hídricos.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, cronologías, Cuatrociénegas, El Niño, paleoclima, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Fecha de recepción: 21 de diciembre de 2007.

Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2008.

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA), INIFAP. Correo-e: villanueva.jose@inifap.gob.mx

ABSTRACT

The objective of this study was to determine historic hydroclimate variability using tree rings as proxy data and to analyze the impact of atmospheric circulatory patterns on water availability. Two climate-sensitive Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) chronologies were developed in Sierra La Madera, Cuatrociénegas, Coahuila. The earlywood chronology significantly responded to the seasonal January-June precipitation, therefore a precipitation reconstruction was developed for the total length of the chronology (1719-2003). The reconstruction shows the presence of extreme droughts in the periods 1740-50s, 1790s, 1860s, 1890-1900s, 1920s, 1950s, and 1990-2000s, at frequencies of around 50 years. At difference of other reconstructions, the most recent drought (1900-2000) still continues in this region, but water use has increased threatening the Cuatrociénega marshes which is a priority site for conservation due to its aquatic and subaquatic biodiversity. The impact of atmospheric circulatory patterns such as ENSO on the amount of recorded precipitation has changed through time for this region. The impact of atmospheric circulatory patterns affecting northeastern Mexico explains much of the climatic conditions on the Cuatrociénega area as deduced by the presence of common droughts all over the region. Increasing the network of regional tree-ring chronologies may help to improve the understanding of climate for water management purposes.

Keywords: Tree rings, chronology, Cuatrociénegas, El Niño, Paleoclimate, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

INTRODUCCIÓN

El valle de Cuatrociénegas en el estado de Coahuila constituye el humedal más importante del desierto Chihuahuense. Desde el punto de vista científico, el área es conocida internacionalmente por constituir un ecosistema único en su género, debido a los endemismos de fauna acuática y subacuática, los cuales evolucionaron desde tiempos prehistóricos a consecuencia de su aislamiento hidrológico (INE, 1999).

En 1994, el gobierno mexicano a través del Departamento de Áreas Naturales Protegidas del Instituto Nacional de Ecología, decretó este lugar como "Área Natural Protegida" en la categoría de "Protección de Flora y Fauna". Su extensión es de 84,347.5 ha y está englobada por una cuenca endorreica que tiene manantiales, arroyos permanentes y áreas inundadas. Forma parte de la región hidrológica Bravo-Conchos, zona geohidrológica Cuatrociénegas-San Miguel, e incluye dos fuentes de agua subterránea, con una tasa de extracción anual ($49 \times 10^6 \text{ m}^3$) que supera a la recarga ($25 \times 10^6 \text{ m}^3$), lo que genera un déficit de $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ (CONAGUA, 2006).

Aunque la planicie es la parte más conocida del Valle de Cuatrociénegas, está rodeado por montañas que conforman verdaderas "islas del cielo" o "sky islands" con alta biodiversidad y que a lo largo de un gradiente altitudinal, dan paso a una serie de ecosistemas diversos desde pastizales y matorrales desérticos, en la planicie hasta encinares y bosque mixto de coníferas en su máxima elevación (Villarreal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005).

Destacan entre esta vegetación montana, los manantiales perennes en la parte baja del valle, fenómeno que no ha sido del todo elucidado; sin embargo, es innegable la influencia que ejercen estos bosques mixtos en el ciclo hidrológico y en la recarga de los acuíferos, así como en la biodiversidad misma de la región, por lo cual esta zona ha ganado reconocimiento mundial (Pinkava, 1979).

Una de las especies forestales en estos ecosistemas montañosos es *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco ("Douglas-fir"), que es una de las coníferas más longevas en México, con madera de excelente calidad comercial y de alta sensibilidad a cambios climáticos, ya que registra en sus anillos de crecimiento anual, tanto de madera temprana como tardía, la influencia de la precipitación invernal y de aquella que se registra en la época cálida del año (Stahle *et al.*, 2000).

El conocimiento histórico de la variabilidad hidroclimática que se puede derivar de los anillos de árboles es una herramienta fundamental con uso potencial para propósitos de planeación del manejo del recurso hídrico, y además, indica la periodicidad de eventos secos y húmedos que han tenido lugar en la región durante siglos; esto es importante para determinar la influencia de fenómenos de circulación atmosférica global que históricamente han impactado el clima de la región (Villanueva *et al.*, 2007).

En la actualidad no existe información paleoclimática sobre el área de Cuatrociénegas y los datos instrumentales disponibles no se extienden más allá de los últimos 50 años. Por lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: 1) Generar series cronológicas de anillos de crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* presente en elevaciones superiores de Sierra La Madera para desarrollar una reconstrucción de precipitación en la planicie de Cuatrociénegas, Coahuila; 2) Determinar su variabilidad histórica en el tiempo y 3) Analizar la influencia climática que ejercen en la región patrones de circulación atmosférica que impactan otras partes del noreste Mexicano y que pueden explicar el comportamiento histórico hidroclimático de la región con fines de planeación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de interés

Los sitios de estudio, aledaños uno al otro, se localizan en Sierra La Madera,

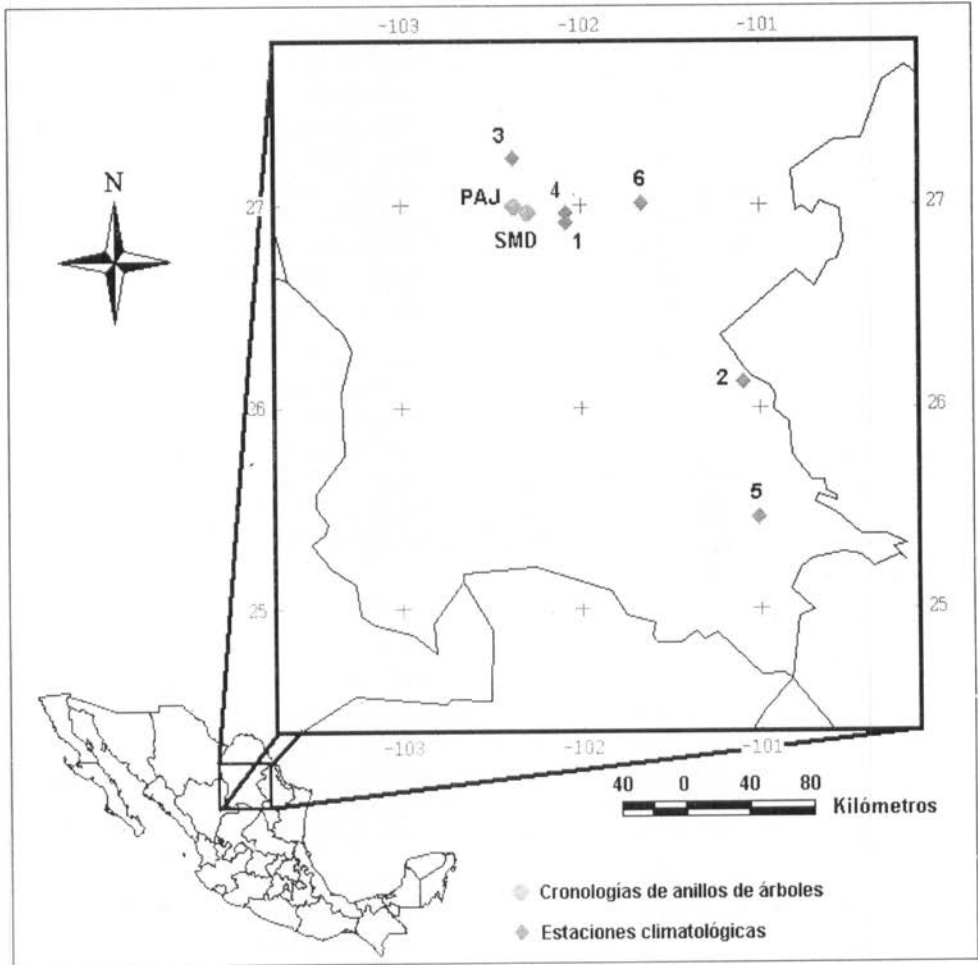
Cuatrociénegas; el primer paraje denominado "Cañón del Oso" (SMD), se ubica en las coordenadas 27° 01' 27" N, 102° 17' 27" W; 2,420 m de elevación; mientras que el segundo, "El Pajarito" (PAJ), en las coordenadas 27° 02' 08" N, 102° 22' 29" W, con una elevación de 2,380 m (Figura 1). En general, la sierra está integrada por un macizo de rocas calizas en dirección noroeste-sureste. Aunada a otras con la misma orientación se erigen en verdaderas barreras físicas que inhiben el paso de las corrientes húmedas procedentes tanto del Golfo de México como del Océano Pacífico, de tal forma, que la precipitación en la parte baja (donde se ubica el humedal), en general, no alcanza los 200 mm anuales, con una temperatura que desciende por debajo de los 0°C en el invierno y sobrepasa los 44°C en el verano.

El bosque mixto de coníferas o bosque montano se desarrolla en la parte más elevada de la Sierra La Madera, donde se establecieron los sitios de muestreo, en alturas que superan los 2,380 m. En estos sitios y en micrositos húmedos de las exposiciones norte de cañones y bajadas, la vegetación está compuesta por individuos dispersos de *Pseudotsuga menziesii*, *Abies durangensis* var. *coahuilensis* (I. M. Johnst.) y *Pinus ayacahuite* Ehrenberg & Schltldl., con un estrato codominante de *Quercus gravesii* Sudworth, *Arbutus texana* Buckl., *Acer grandidentum* Nutt. y *Cornus* L. (Pinkava, 1979).

En sitios más secos y con mayor insolación, en las exposiciones sur y sureste, se distribuyen *Pinus arizonica* Engelm., *Pinus remota* (Little) D.K. Bailey & Hawksworth y *Cupressus arizonica* Greene, asociados con otras especies de encinos y de arbustos y cactáceas con mayor tolerancia a condiciones de aridez (Pinkava, 1979). En el pasado reciente, algunos rodales de coníferas de Sierra La Madera estuvieron sujetos al aprovechamiento forestal intensivo. Asimismo, los incendios son comunes en muchas de estas áreas, lo que se evidencia por la existencia de arbolado muerto en pie con fuste carbonizado y cicatrices de incendios en algunos especímenes de pinos, lo cual también es indicativo de que incendios de baja intensidad ocurrieron de forma natural (iniciados por descargas eléctricas), lo que a través de los años mantuvo la estabilidad de estos ecosistemas; aunque en la actualidad, diversas acciones de cambio en la cobertura vegetal han alterado este régimen con efectos negativos en la biodiversidad (Fulé *et al.*, 2005).

Derivado de la influencia de incendios recientes, también se observa vegetación sucesional, representada por manzanita (*Arctostaphylos pungens* Kunth.), encinos arbustivos (*Quercus* spp.), cortadillo (*Nolina cespitifera* Trel) y algunas especies de magueyes (*Agave* spp.), cactáceas (*Opuntia* spp.) y sotol (*Dasyliirion* spp.), entre las principales.

Debido a la inaccesibilidad a los sitios de muestreo, la vegetación manifiesta disturbio mínimo (donde sólo ha existido extracción ocasional de madera para postes, vigas y para producir utensilios domésticos), lo cual es deseable para este tipo de



Las estaciones meteorológicas aledañas a los sitios de muestreo aparecen enumeradas y se utilizaron para analizar la respuesta climática de las cronologías generadas.

Figura 1. Ubicación geográfica de los parajes de muestreo (SMD, PAJ) de *Pseudotsuga menziesii* en Sierra La Madera, Cuatrociénegas.

estudios, que tratan de maximizar la señal climática presente en los crecimientos anuales de las especies seleccionadas y discriminar la influencia antropogénica.

En el periodo de 2003 a 2004 se trabajó en dos parajes de bosque mixto en Sierra La Madera, Cuatrociénegas, Coahuila. Por la sensibilidad climática de *Pseudotsuga menziesii*, se escogieron ejemplares procedentes de micrositos de pobre calidad,

donde el crecimiento del arbolado depende exclusivamente de las condiciones de humedad disponibles. De cada árbol se extrajeron dos virutas, una a la altura del pecho y otra de forma perpendicular a la pendiente, con taladro Pressler de 5 mm de diámetro interno y extensión variable (45 a 50 cm); así mismo, con motosierra se cortaron secciones transversales de tocones, árboles muertos o madera subfósil (madera sobre la superficie del suelo o semienterrada). Los núcleos de crecimiento, se identificaron, montaron y pegaron en trozos acanalados de madera para facilitar su manejo; después se pulieron con lija de diversos grados (grano grueso a fino, grados progresivos de 120 a 1200); el mismo procedimiento fue utilizado con las secciones trasversales para destacar la edad.

En el laboratorio de Dendrocronología del INIFAP y con el apoyo de un estereomicroscopio trinocular de alta resolución modelo SZ2-ILSI, resolución 100-120, marca Olympus Corporation, los anillos se contaron y fecharon al año exacto de su formación mediante el uso de técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968). La técnica del fechado cruzado o cofechado utilizada para este fin consistió en la identificación de patrones comunes de la variación interanual de los anillos de crecimiento, que se repiten de una muestra a otra, de tal forma, que a cada anillo de crecimiento se le asignó una fecha al año de su formación (Douglas, 1946).

Una vez fechadas las muestras, cada anillo anual se seccionó en bandas de madera temprana (EW, siglas en Inglés), tardía (LW, siglas en Inglés) y anillo total (RW, siglas en Inglés) y posteriormente estas bandas se midieron individualmente con un sistema de medición modelo TA UniSlide, marca VELMEX Inc. (equipo compuesto por una platina deslizable y un codificador lineal con una precisión de medición de 0.001 milímetros), sistema integrado a un procesador PC y un estereomicroscopio con una retícula montada en el ocular para ubicar los límites de cada anillo de crecimiento.

El cofechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo se verificó con el programa COFECHA, que correlaciona períodos de 50 años con traslape entre períodos de 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Las tendencias biológicas (competencia, liberación) y geométricas (área de fuste se incrementa con la edad y el crecimiento anual tiende a disminuir al distribuirse en una mayor superficie) no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN, al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y luego al dividir cada valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva. Esto creó una serie de índices normalizados (cronologías) con media de 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987).

Para determinar la influencia del clima en el crecimiento estacional de *Pseudotsuga menziesii*, se recopilaron de la base climática ERIC II (Instituto

Mexicano de Tecnología del Agua, 2000) aquellas estaciones más cercanas a los sitios de colecta (Figura 1).

La respuesta climática entre precipitación y el crecimiento anual se investigó con la subrutina "Análisis de Función de Respuesta" (RESPO, por sus siglas en inglés) incluida en el paquete de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés). Posteriormente con la mitad de datos climáticos disponibles se realizó una calibración entre la cronología y los registros estacionales de precipitación y con la otra mitad, se realizó una verificación (Fritts, 1991). Finalmente se obtuvo una ecuación de transferencia para el período total de datos de precipitación disponibles, la cual fue utilizada para desarrollar la reconstrucción de precipitación en la longitud total de la cronología. A la serie de alta frecuencia (resolución anual) se le ajustó una curva decenal flexible (baja frecuencia) para resaltar eventos secos o húmedos (Cook y Peters, 1981).

La reconstrucción de precipitación generada se comparó (correlacionó) con otras reconstrucciones para el noreste de México. Los períodos de sequía presentes en la reconstrucción también se compararon con curvas flexibles que evidencian la ocurrencia de eventos de baja frecuencia registrados en otras reconstrucciones de precipitación realizadas para sitios ubicados en las Sierras Madre Oriental y Occidental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se generaron cronologías de anillo total, madera temprana y tardía para los parajes Cañón del Oso y Pajarito en Sierra La Madera, Cuatrociénegas, Coahuila. Las cronologías tienen una extensión de 285 años (1719-2003) para el paraje SMD y 224 años (1780-2003) para el paraje PAJ (Figura 2).

Al comparar las cronologías EW para ambos sitios (período común 1780-2003) se obtuvo una correlación de 0.73 ($p < 0.0001$), lo que indica que las dos series poseen una respuesta climática similar, atribuible a que ambos sitios se localizan muy cerca uno de otro y se ubican en una misma cuenca hidrológica, por lo que son afectados por sistemas atmosféricos comunes. Por lo anterior, se procedió a integrar los dos sitios muestreados para generar una cronología más representativa de la región estudiada en el espectro climática.

Con respecto a las cronologías de madera temprana, tardía y total y su relación con datos climáticos regionales, la primera mostró una mayor correlación con la precipitación acumulada estacional en contraposición con la precipitación estacional acumulada de estaciones climáticas individuales. La mejor respuesta para la mensual se obtuvo para enero, marzo, mayo y julio; sin embargo, a nivel estacional la mayor correlación se determinó para el período de precipitación acumulada de enero a junio ($p < 0.05$) (Figura 3). Lo anterior implica que el

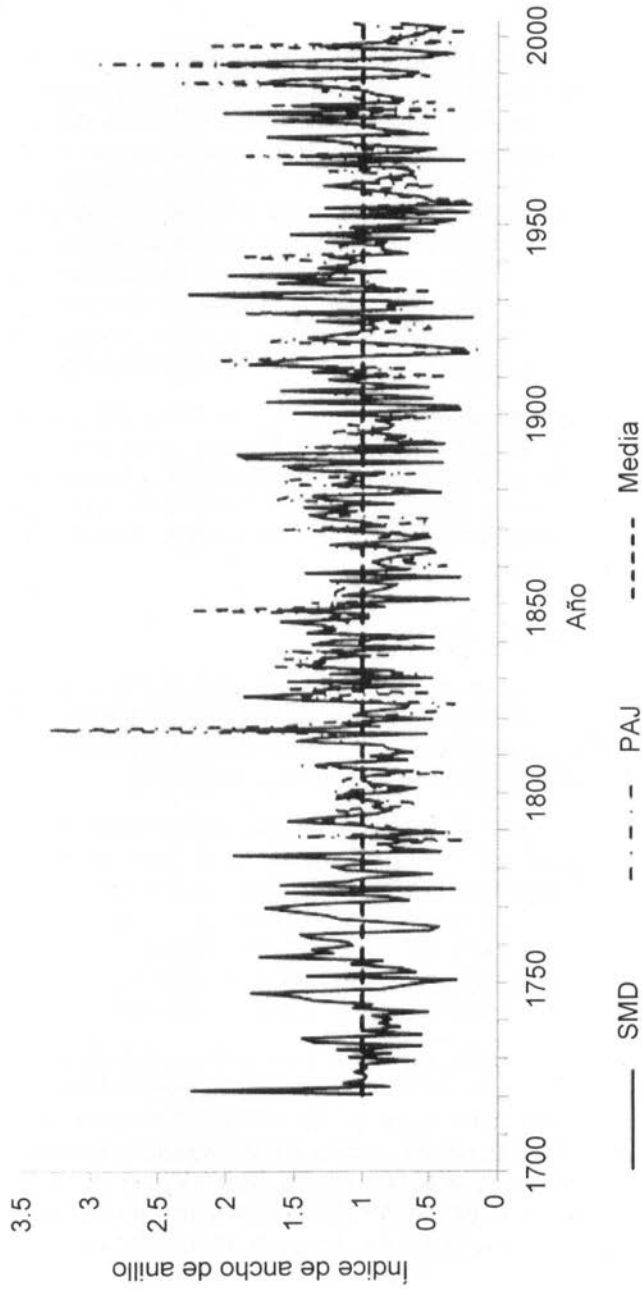


Figura 2. Cronologías de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii* para dos sitios de colecta, Cañón del Oso (SMD) y Pajarito (PAJ) en Sierra La Madera, Coahuila.

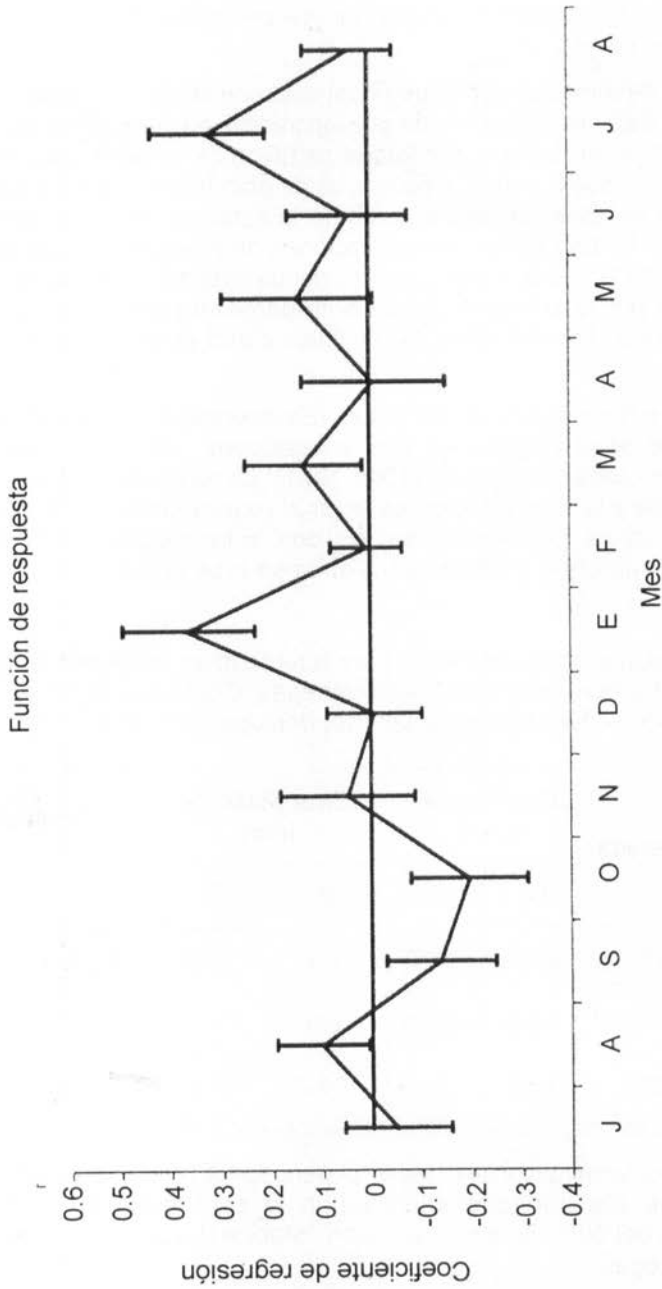


Figura 3. Función de respuesta climática entre la cronología promedio de madera temprana e información climática regional.

crecimiento de madera temprana de los árboles de *Pseudotsuga menziesii* en Sierra La Madera está influenciado por aquella precipitación que ocurre en la estación invierno-primavera.

La humedad que se almacena en el perfil del suelo en la época fría del año que resulta de lluvias de baja intensidad y mínima evaporación, en general, no sobrepasa la capacidad básica de infiltración, por lo que se favorece su acumulación en los primeros horizontes del suelo, lo que, a su vez, es de gran relevancia para satisfacer la demanda hídrica de esta conífera al inicio de la estación de crecimiento. Una respuesta similar se ha reportado para poblaciones de *Pseudotsuga* de la Sierra Madre Occidental y de la Sierra Madre Oriental, donde más del 70% del crecimiento anual es explicado por la precipitación invierno-primavera (Stahle *et al.*, 2000; Villanueva *et al.*, 2000; Therrell *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2007).

Para propósitos de reconstrucción, los datos instrumentales de precipitación del intervalo 1945-1998 se dividieron en dos subperíodos, uno para calibración (1973-1998) y el otro para verificación (1945-1971). La regresión entre el ancho de madera temprana y la precipitación estacional (enero-junio), calibró el 61.0 y 59.0% de la varianza climática para los dos subperíodos, 1973-1998 y 1945-1971 respectivamente, y 61.5% para el lapso total (1945-1998) (Cuadro 1, Figura 4).

Cuadro 1. Análisis estadístico de calibración para la reconstrucción de la precipitación estacional (enero-junio) de Cuatrociénegas, Coahuila con la cronología regional de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii*.

Período	R ² ajustada	Coeficiente (mm)		Error estándar (mm)		t-Estadístico	
		B ₀	B ₁	B ₀	B ₁	B ₀	B ₁
1945-1998	0.61	36.5	68.2	8.4	7.8	4.3***	8.8***
1945-1971	0.58	44.0	59.0	9.5	10.2	4.7***	5.8***
1973-1998	0.59	32.6	72.1	14.7	12.1	2.2*	5.9***

NS: No significativa (p > 0.05); *Significativo p < 0.05; ***Significativo p < 0.001.

El coeficiente de determinación (R²) para el periodo total de datos disponibles (1945-1998) fue de 0.61, lo que implica que la cronología de anillos de árboles explica más del 60% de la precipitación estacional que se presenta en el Valle de Cuatrociénegas.

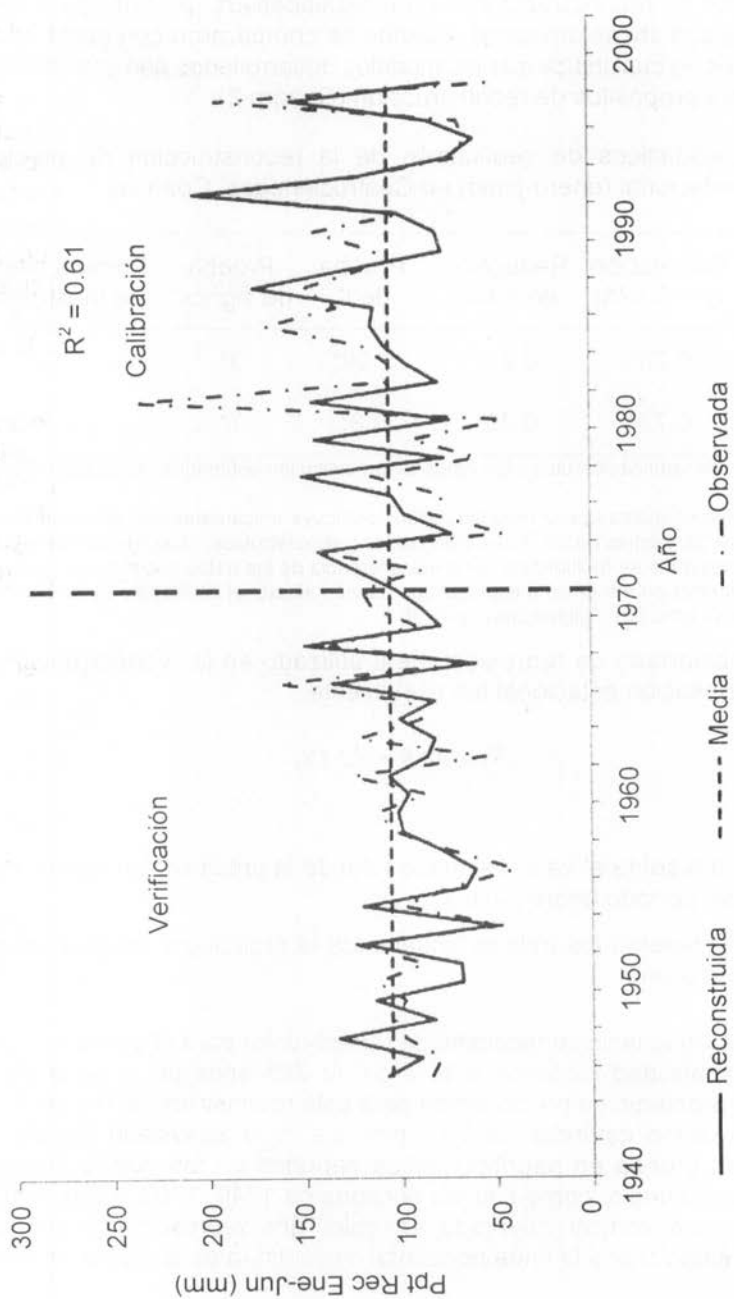


Figura 4. Comparación entre la precipitación reconstruida para el periodo enero-junio (línea sólida) y observada (línea punteada).

Los modelos de reconstrucción fueron significativos ($p < 0.05$) para todas de las pruebas estadísticas utilizadas, cuando se compararon con datos climáticos independientes, lo cual indica que los modelos desarrollados son estadísticamente confiables para propósitos de reconstrucción (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estadísticos de verificación de la reconstrucción de precipitación estacional (enero-junio) en Cuatrociénegas, Coahuila.

Período	Correlación ($p = 0.975$)	Reducción de error ^a	Prueba de t^b	Prueba de signos ^c	Primera diferencia de la correlación ^d
1973-1998	0.78*	0.27*	2.99*	3*	3*
1945-1971	0.77*	0.63*	3.8*	7*	3*

El procedimiento de verificación utiliza los datos de precipitación estimados derivados del período de calibración.

^a Un resultado positivo indica que la reconstrucción contribuye únicamente con información climática;

^b Comparación de las medias de los datos observados y reconstruidos; ^c Las medias se substraen de cada serie y los residuos se multiplican; ^d Primera diferencia de los datos observados y reconstruidos ($t - t_1$). La transformación remueve tendencias que pueden afectar el coeficiente de correlación.

NS: No significativa ($p > 0.05$); *Significativo, $p < 0.05$.

El modelo bivariado de regresión lineal utilizado en la reconstrucción de los datos de precipitación estacional fue el siguiente:

$$\hat{Y}_t = 32.6 + 72.1X_t$$

Donde:

\hat{Y}_t = representa el valor estimado total de la precipitación estacional (mm) del período enero-junio y

X_t = representa los índices anuales de la cronología residual de madera temprana.

La precipitación estacional reconstruida (enero-junio) para el período 1719-2003, indica alta variabilidad climática a lo largo de 285 años de la serie de tiempo (Figura 5). El promedio de precipitación para esta reconstrucción fue de 105.0 mm con una desviación estándar de 28.1 mm. La línea suavizada flexible a nivel decenal (línea gruesa en negritas) indica periodos en los que la precipitación fue inferior al promedio, como son las décadas de 1740, 1790, 1860, 1900, 1950 y 1990. La línea vertical quebrada en color gris representa la precipitación reconstruida estacional y la línea horizontal discontinua es la media reconstruida.

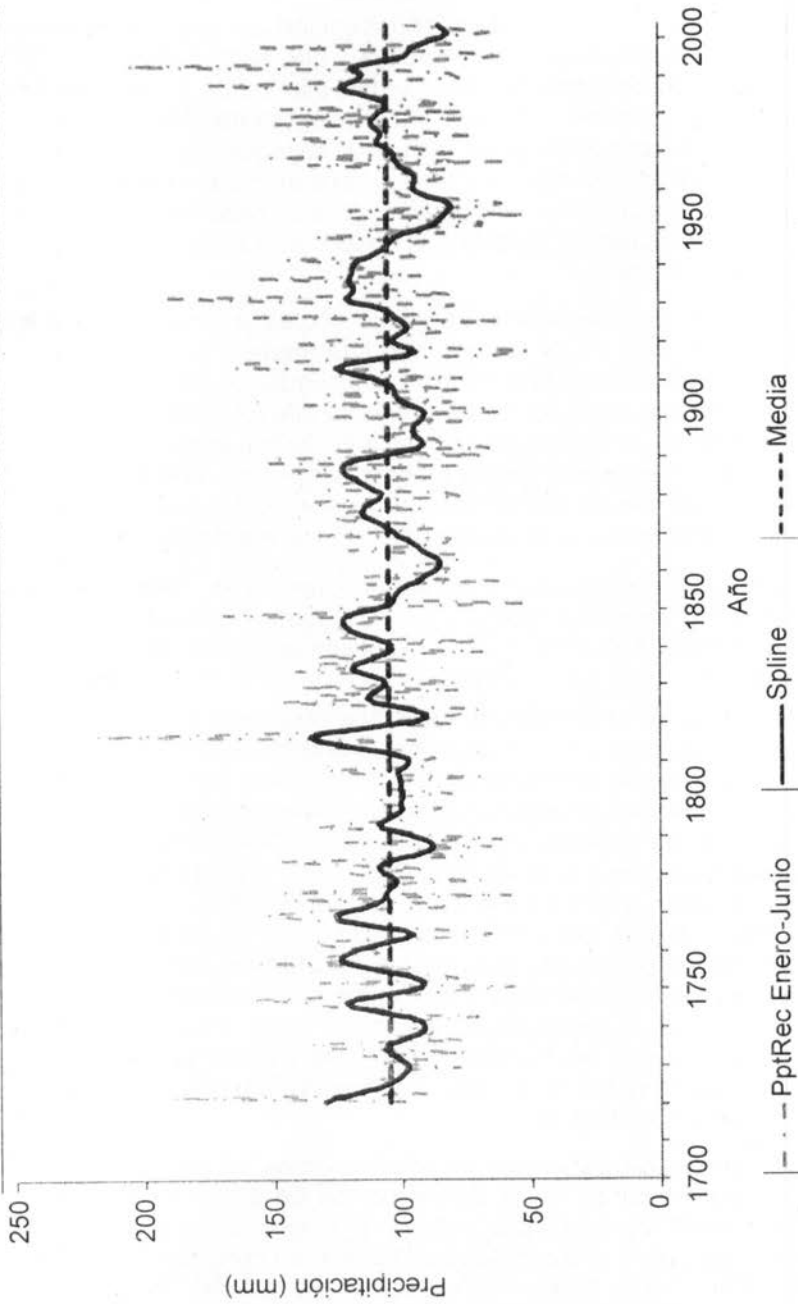


Figura 5. Precipitación estacional reconstruida invierno-primavera (enero-junio) para el periodo 1719-2003 en Cuatrociénegas, Coahuila.

Un aspecto relevante de esta reconstrucción es que los crecimientos de los árboles de *Pseudotsuga* en elevaciones que sobrepasan los 2,300 m son un "proxy" de la precipitación observada en la planicie de Cuatrociénegas que se encuentra a una elevación cercana a 740 m y explica hasta un 61% la variabilidad del período invierno-primavera observada en dicha región. Esta variabilidad, aunque alta, debe ser menor a lo que los árboles pudieran experimentar en la parte alta de la montaña; no obstante, el volumen de precipitación que se presenta en esta altitud es desconocido, debido a la ausencia de estaciones climáticas a esa elevación de la montaña.

La precipitación más importante para este sitio es la de verano, que constituye más de 50% del total anual; sin embargo, la madera tardía, que se forma en esa época del año, respondió en términos climáticos de modo muy similar a la madera temprana, pero con una correlación inferior para el mismo periodo de lluvias. Finalmente, la cronología completa de anillos estuvo influenciada por el mismo período (enero-junio) que la madera temprana y tardía, aunque esta vez la precipitación del mes de julio también fue trascendente, pero con una correlación total igualmente menor a la detectada por la madera temprana.

La reconstrucción indica etapas de baja frecuencia en los que la precipitación estacional fue inferior a la media (105 mm); caso concreto son los periodos de 1760, 1850-60, 1890-1900, 1950 y 1990, con una precipitación que no superó los 85.0 mm.

La región de Cuatrociénegas muestra una respuesta positiva a los patrones atmosféricos que afectan la lluvia de primavera-verano en la Sierra Madre Oriental. Lo anterior se corroboró al comparar la precipitación reconstruida para Cuatrociénegas y tres reconstrucciones de invierno-primavera para la región de Saltillo, Coahuila (Cerano, 2004; Constante, 2007; Villanueva *et al.*, 2007). La correlación entre reconstrucciones fluctuó de 0.38 a 0.62 ($p < 0.0001$), no obstante que la precipitación media es diferente, ya que mientras que para la ciudad de Saltillo fue del orden de 120.0 mm, para la parte baja del de Sierra de Zapalinamé con presencia de bosque de piñonero, fue de 240 mm y de 124 mm para el sur del estado de Nuevo León; para Cuatrociénegas solo alcanzó 105 mm, lo cual indica que, aunque la precipitación en ambos sitios está influida por patrones atmosféricos comunes, las barreras orográficas y el distanciamiento a la fuente de origen de las corrientes húmedas (continentalidad), provoca una disminución significativa en la cantidad de lluvia.

La importancia de esta reconstrucción radica no tan solo en los datos anteriores, si no también en la determinación de la variabilidad hidroclimática detectada a nivel regional, que muestra la presencia de sequías intensas en reconstrucciones para la Sierra Madre Oriental, en concreto, las de las décadas de 1750, 1790, 1860, 1900, 1920, 1950, 1970 y 1990, lo que significa que patrones de circulación atmosférica común ejercen una fuerte influencia en toda

esta región, con variaciones propias atribuibles a características fisiográficas específicas de cada sitio.

En esta región, el efecto de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, siglas en Inglés), medido a través del Índice de Lluvia Tropical (TRI, siglas en Inglés), el cual consiste en un estimado de la variación de ENSO, que utiliza las anomalías de precipitación en la región del Pacífico Central y que tiene mayor estabilidad que el Índice Tahiti-Darwin (Wright, 1979), que destacó alta variabilidad a través del tiempo, al correlacionarse con la precipitación reconstruida en el periodo de 1894 a 1996.

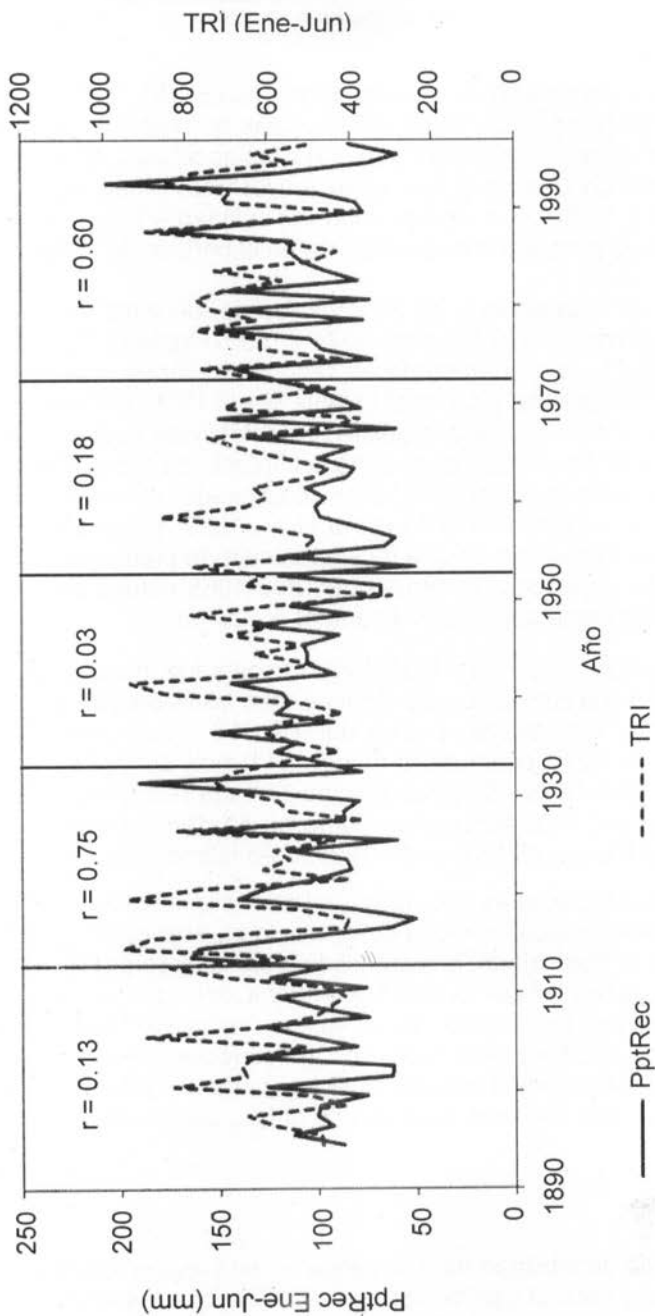
Las correlaciones en subperiodos de 20 años fueron tan altas como de 0.75 (periodo 1914-1933) a casi nula (0.03) entre 1934 y 1953 (Figura 6). Esta variación de respuesta también ha sido detectada en reconstrucciones paleoclimáticas para la Sierra Madre Occidental y Oriental (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano, 2004), con lo que se demuestra la inestabilidad a largo plazo de la teleconexión del Pacífico Ecuatorial con el clima del noreste de México. Periodos de sequía prolongados en esta región pudieran estar relacionados con acontecimientos intensos de El Niño en su fase cálida (Magaña *et al.*, 1999) y que se evidencian como eventos de baja frecuencia en una reconstrucción de precipitación Invernal para Durango, donde el periodo de sequía de 1950-1965 estuvo asociado con valores TRI extremadamente bajos (Cleaveland *et al.*, 2003).

En esta reconstrucción, el periodo 1950-1965 también fue inusualmente seco, aunque no se encontró una correlación significativa entre los valores de precipitación y el TRI; no obstante, los valores medios del TRI (587 mm) para este lapso (1950-1965) estuvieron por debajo de la media (611 mm) derivada del total de datos disponibles (1894-1996). Sequías previas en esta reconstrucción quizás hayan sido influidas por este fenómeno, como se ha demostrado para otras regiones del norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003).

La región de Cuatrociénegas es muy valiosa por su biodiversidad, y reconstrucciones paleoclimáticas como la desarrollada en este estudio contribuyen de manera notable a determinar la variabilidad de la precipitación; esta es información básica para planear el uso sustentable del agua en esta región. La presión sobre los recursos hídricos en el valle es cada vez más intensa y la explotación de este acuífero realizada sin un conocimiento previo de las fluctuaciones hidroclimáticas en el pasado, puede generar un disturbio irreversible e incluso la desaparición de este ecosistema único, patrimonio de México y de la humanidad.

CONCLUSIONES

El entendimiento de la variabilidad hidroclimática en una región sujeta a extrema presión antropogénica para el uso de los recursos hídricos resulta fundamental



Las correlaciones indican gran inestabilidad a través del tiempo de la influencia de ENSO en la precipitación primavera-verano que ocurre en esta región. Sólo los subperíodos de 1914 a 1933 y 1974 a 1993 con correlaciones de 0.75 y 0.60 fueron significativas ($p < 0.01$).

Figura 6. Correlación entre la precipitación estacional (enero-junio) de precipitación (PptRec) para Cuatrociénegas, Coahuila y el Índice Tropical de Lluvia (TRI) para el mismo periodo en subperíodos de 20 años.

para considerar medidas preventivas y desarrollar estrategias de manejo para su mejor uso. Las cronologías de anillos de árboles constituyen la fuente indirecta de mayor resolución de alta y baja frecuencia para extender en el tiempo la información climatológica, ya que los datos instrumentales, como es en el caso de la región de Cuatrociénegas no se extienden más allá de los últimos 50 años.

En este estudio, dos cronologías de *Pseudotsuga menziesii* climáticamente muy sensibles se generaron en Sierra La Madera, Cuatrociénegas, Coahuila. La respuesta de estas cronologías fue, en esencia, para la precipitación acumulada del periodo enero-junio.

La reconstrucción de precipitación que se extiende para el periodo 1719-2003 indica sequías recurrentes en periodos aproximados de 50 años (1740-50, 1790, 1860, 1890-1900, 1950 y 1990). De hecho la reconstrucción indica que la sequía de la última década todavía persiste para esta región a diferencia de la extracción de agua que se ha incrementado de forma notable, en particular para el establecimiento de cultivos de alta demanda hídrica.

El efecto de patrones de circulación atmosférica global -como es el caso de El Niño Oscilación del Sur- en la precipitación de esta región ha sido variable en el tiempo, aunque sequías intensas como la detectada entre 1950 y 1965, estuvo asociada con una caída en el TRI, que es un estimado del fenómeno ENSO. La influencia de fenómenos atmosféricos que afectan una gran superficie del noreste de México se han sentido en esta zona, ya que sequías reconstruidas para Saltillo, Coahuila y sur del estado de Nuevo León, también están presentes en esta reconstrucción, lo que a la vez sirve para verificar la confiabilidad de la misma. Las barreras orográficas en el valle de Cuatrociénegas obstaculizan el paso de corrientes húmedas tanto del este como del oeste, por lo que el efecto de estos patrones circulatorios se diluye en el caso de provocar mayor precipitación o se magnifica en el caso de sequías.

La expansión de una red de cronologías de anillos de árboles en esta región permitirá expandir en el tiempo la información paleoclimática y conocer con detalle la variabilidad hidroclimática en esta región, ícono de biodiversidad del desierto Chihuahuense.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento otorgado a través de fondos del Instituto Interamericano para Investigación del Cambio Climático (IAI), proyecto CRN # 2047, a su vez auspiciado por el US/Nacional Science Foundation (Grant GEO-0452325).

REFERENCIAS

- Cerano P., J. 2004. Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento Forestal. Tesis Profesional. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 152 p.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Díaz and B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2006. Statistics of water in Mexico. SEMARNAT. 4th edition. México, D. F. México. 186 p.
- Constante G., V. 2007. Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera para los últimos cuatro siglos en el ejido Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento Forestal. Tesis Profesional. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 72 p.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47: 37-59.
- Cook, E. R. and K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies: *Tree-Ring Bulletin* 41: 45-53.
- Douglas, A. E. 1946. Precision of ring dating in tree-ring chronologies. *Tree Ring Research Bulletin* 3: 1-21.
- Fritts, H. C. 1991. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data. University of Arizona Press. Tucson, AZ, USA. 286 p.
- Fülé, P. Z., J. Villanueva-Díaz and M. Ramos-Gómez. 2005. Fire regime in a conservation reserve in Chihuahua, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 320-330.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57(2): 205-221.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2000. Extractor Rápido de Información Climática II (ERIC II). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Jiutepec, Morelos, México. s/p.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 1999. Programa de manejo del área de protección de flora y fauna Cuatrociénegas. México, D. F. México. 167 p.
- Magaña R., V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. In: Magaña Ruiz, V. (Editor). Los impactos de El Niño en México. SEP - CONACYT. México, D. F. México. pp. 23-68.
- Pinkava, D. J. 1979. Vegetation and flora of the Bolsón of Cuatrociénegas region, Coahuila, Mexico – I. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 38: 35-73.

- 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., J. Villanueva, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell, G. J. Paull, B. T. Burns, W. Salinas, H. Suzan and P. Z. Fulé. 2000. Recent tree-ring research in Mexico. *In*: Roig, F.A. (Comp.). *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC. pp. 285-306.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. The University of Chicago. Chicago, IL. USA. 73 p.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland and J. Villanueva-Díaz. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research* 107 (D14): 6-1 – 6-8.
- Villanueva D., J., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland, y M. D. Therrell. 2000. Estado actual de la dendrocronología en México. *Rev. Cien. For. en Méx.* Vol. 25 (88): 5-36.
- Villanueva-Díaz, J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano-Paredes, M. D. Therrell and M. K. Cleaveland. 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83: 117-131.
- Villarreal-Quintanilla, J. A. y J. A. Encina-Domínguez. 2005. Plantas vasculares endémicas de Coahuila y algunas áreas adyacentes, México. *Acta Botánica Mexicana* 70: 1-46.
- Wright, P. B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature* 277: 371-374.