

Ecología

## Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México)

### *Climatic influence on radial growth in four conifer species in the Sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, Mexico)*

Genaro Gutiérrez-García <sup>a,\*</sup> y Martin Ricker <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México, México

<sup>b</sup> Departamento de Botánica, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado postal 70-233, 04510 Ciudad de México, México

\*Autor para correspondencia: genaro.gutierrez@gmail.com (G. Gutiérrez-García)

Recibido: 18 abril 2018; Aceptado: 3 diciembre 2018

#### Resumen

Se emplearon técnicas dendrocronológicas tradicionales para analizar la influencia del clima sobre el crecimiento radial del tronco en las especies arbóreas *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pinus teocote* en un bosque mixto de coníferas. Los resultados del análisis clima-crecimiento indican una correlación positiva del crecimiento de las 4 especies con la precipitación de noviembre del año anterior a mayo del actual, así como una correlación negativa con la temperatura máxima de octubre del año anterior a junio de este año. En *Abies vejarii* y *Pinus strobiformis*, la temperatura mínima se correlacionó negativamente con el crecimiento radial en los meses de mayo y junio del año actual, respectivamente. El crecimiento radial de las 4 especies se correlacionó de manera positiva con el crecimiento de otras coníferas en el norte del país, el clima del noreste de México y con fenómenos climatológicos a gran escala, como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP). La sincronía del crecimiento arbóreo en el norte del país se debe a la influencia que ejercen los fenómenos ENOS y ODP en el clima regional.

*Palabras clave:* Dendrocronología; Anillos de crecimiento; ENOS; ODP

#### Abstract

Traditional dendrochronological techniques were used to assess the influence of climate on radial trunk growth in the tree species *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus teocote*, and *Pinus strobiformis* in a mixed conifer forest. The results of the climate-growth analyses indicate a positive correlation in the four species with precipitation from previous-year November to current-year May, and a negative correlation with maximum temperature from previous-year October to current-year June. In *Abies vejarii* and *Pinus strobiformis*, minimum temperature was negatively

correlated with radial growth in current-year May and June, respectively. Radial growth in the four species was positively correlated with the growth of conifers in northern Mexico, the climate of northeastern Mexico, and with broad-scale atmospheric circulation patterns, such as El Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). Tree-growth synchronicity in northern Mexico is due to the influence of ENSO and PDO on the regional climate.

**Keywords:** Dendrochronology; Tree-ring; ENSO; PDO

## Introducción

Los bosques cubren aproximadamente 40 millones de km<sup>2</sup> en zonas boreales, templadas y tropicales, lo que equivale a cerca de 30% de la superficie terrestre (MacDicken et al., 2016). Estos ecosistemas proporcionan servicios ecológicos, económicos, sociales y estéticos, tanto a sistemas naturales como a la humanidad (Hassan et al., 2005). Además, los bosques son hábitat de millones de especies e influyen en el clima a través de intercambio de energía, agua, bióxido de carbono y otros químicos con la atmósfera (Bonan, 2008). Existe una gran presión sobre estos ecosistemas a nivel mundial, ya que en los últimos 25 años se han perdido 129 millones de hectáreas (FAO, 2015), extensión que equivale a más de la mitad del territorio nacional (65.8%) o a la extensión total de Sudáfrica.

En México la cobertura actual de bosques es de 660,400 km<sup>2</sup>, el equivalente al 34% del país. Sin embargo, de 1990 al 2015 se perdieron 37,200 km<sup>2</sup>, lo que equivale a una pérdida del 1.9% del territorio mexicano (FAO, 2015). En la actualidad los bosques del mundo y de México enfrentan una amenaza potencial, adicionalmente al problema de la deforestación: el cambio climático global. El Panel Intergubernamental del Cambio Climático estima que el planeta se ha calentado 0.85 °C en promedio durante el periodo de 1880 a 2012 (IPPC, 2013), siendo los años 2016 y 2017 los más cálidos en el registro instrumental existente (GISTEMP, 2017). El cambio climático es responsable de alteraciones en diversos procesos de los ecosistemas forestales, tales como distribución, fenología, productividad y mortalidad (Allen et al., 2010; Boisvenue y Running, 2006; Chmielewski y Rötzer, 2001; Park-Williams et al., 2012; Thuiller et al., 2008). A nivel mundial, el impacto del aumento de temperatura sobre el crecimiento arbóreo en bosques generalmente es positivo, siempre y cuando no exista una limitante del agua (Boisvenue y Running, 2006). En el caso específico de los bosques de coníferas de México, diversos estudios señalan al agua como el principal factor que limita el crecimiento radial de los árboles en el norte, centro y sur del país (Allende et al., 2016; Amaro-Sánchez, 2012; Villanueva-Díaz et al., 2007; Villanueva-Díaz, Fule et al., 2009; West, 2011).

Las proyecciones de los escenarios de cambio climático para las regiones áridas subtropicales (como el norte de México) predicen cambios en el patrón e intensidad del

ciclo hidrológico, contemplándose una disminución de la precipitación promedio (IPPC, 2013). Los escenarios también pronostican un incremento en la temperatura del planeta de entre 1 y 3.7 °C (IPPC, 2013). Este aumento en la temperatura se traducirá en un incremento de la demanda evaporativa, lo que originará un déficit hídrico aún más severo cuando se presenten episodios de sequía (Trenberth et al., 2014). La disminución de humedad en el norte de México afectaría negativamente el crecimiento de los árboles que habitan dicha región del país. La importancia de la humedad en los bosques de coníferas es indiscutible, ya que árboles en múltiples localidades del país no producen anillos de crecimiento en años extremadamente secos (Gutiérrez-García, 2017; NOAA, 2006).

El objetivo del estudio fue analizar la relación entre el clima y el crecimiento radial en *Abies vejarii* Martínez, *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus strobiformis* Engelm. y *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. (todas Pinaceae) en la sierra de San Antonio Peña Nevada. Además, se examina la influencia de los fenómenos climatológicos como El Niño y la oscilación decadal del Pacífico sobre el clima regional, y por consecuencia, en el crecimiento radial. Se presentan por primera vez las cronologías y la respuesta al clima para *Abies vejarii* y *Pinus teocote*, especies endémicas de México.

## Materiales y métodos

El sitio de estudio se localiza en la sierra de San Antonio Peña Nevada, a 3,000 m snm, en el sureste del estado de Nuevo León, México (fig. 1). Se encuentra dentro del ejido “La Encantada”, municipio de General Zaragoza, a 23° 53' N, 99° 48' O. El clima es templado subhúmedo, con lluvias en verano (C(w2)) (García, 2004). La precipitación media anual es de 600 mm y la temperatura media de 13.4 °C (fig. 2). Los suelos dominantes son los litosoles y rendzinas, intercalados en afloramientos de roca caliza (SPP, 1981). Las especies arbóreas dominantes en el bosque mixto de coníferas son: *Abies vejarii*, *Cornus florida* L., *Cupressus arizonica* Greene, *Ostrya virginiana* (Mill.) K. Koch, *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus strobiformis* Engelm., *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Quercus affinis* Scheidw., *Quercus mexicana* Bonpl. y *Ulmus* sp. (Treviño, 1984).

A principios de junio de 2001, se tomaron 40 núcleos de crecimiento de 20 árboles (2 núcleos por árbol, 5

árboles por especie) con un barreno de Pressler de 0.2 pulgadas (5.08 mm) de diámetro. Las especies analizadas fueron *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pinus teocote*. Se seleccionaron árboles dominantes (con mayor altura), con diámetros a la altura del pecho superiores a 40 cm, saludables, sin daño en fuste o copa. Los árboles se localizaron en un área aproximada de 30 ha. Este estudio fue de tipo prospectivo, con una cantidad de muestras que podría considerarse reducida (5 árboles por especie). Sin embargo, las estadísticas de la cronología indicaron un número de muestras apropiado para captar la variación común de crecimiento que típicamente se asocia al clima. Los núcleos de crecimiento fueron montados en rieles de madera, pulidos y fechados, utilizando técnicas dendrocronológicas tradicionales (Stokes y Smiley, 1996). Las anchuras de anillos fueron medidas con un micrómetro digital, adaptado a una platina de fase deslizable VELMEX

“TA” con una exactitud de 0.001 mm, bajo un estereoscopio a un aumento de 10× a 20×.

Las 4 especies analizadas fueron fechadas por técnicas dendrocronológicas tradicionales, confirmando que forman anillos anuales (Speer, 2010). Todos los núcleos de crecimiento de *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii* y *Pinus strobiformis* se lograron fechar, pero en el caso de *Pinus teocote* se fecharon solamente 8 de 10 núcleos. En *Pinus teocote*, 2 núcleos presentaron problemas anatómicos en la madera, lo que impidió el correcto fechado de las muestras analizadas. La exactitud del fechado fue estadísticamente verificada, utilizando el programa computacional COFECHA (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983).

Las cronologías individuales fueron creadas con el programa computacional ARSTAN, el cual utiliza un ajuste curvo para remover las tendencias de crecimiento relacionadas con la edad, geometría del tronco, y los efectos de dinámica del rodal, como supresión o liberación (Cook, 1985; Cook y Kairiukstis, 1990). El objetivo es maximizar la señal común de crecimiento asociada al clima. Todas las series de anillos fueron estandarizadas con un “spline” cúbico suavizado de 30 años, con una reducción de la varianza del 50% (Cook y Peters, 1981). La estandarización genera índices adimensionales, los cuales fueron sujetos a un modelaje autoregresivo y de promedio móvil, para remover la autocorrelación (Cook, 1987). La remoción de la autocorrelación es necesaria para poder hacer pruebas estadísticas posteriores que relacionan el crecimiento con el clima. Todas las series estandarizadas fueron promediadas, empleando una media robusta bi-ponderada, que a diferencia de la media aritmética, reduce la varianza y el sesgo de los valores atípicos (“outliers”) (Mosteller y Tukey, 1977). Las series de anchuras de anillos de crecimiento estandarizadas y promediadas se conocen en dendrocronología como “cronología de sitio” (Fritts, 2001).

La calidad de la cronología de sitio fue evaluada a partir de estadísticos generados por ARSTAN, como la señal expresada de población o SEP (“Expressed Population Signal” o EPS), la sensibilidad media, y la intercorrelación entre series. La SEP es una estimación del grado de similitud entre la cronología generada por ARSTAN y una cronología hipotética con un número de muestras infinito. Una cronología de sitio con un valor superior a 0.85 es considerada de tener un número de muestras apropiado (Briffa, 1995). La sensibilidad media es una estadística empleada en estudios dendrocronológicos, la cual mide la variabilidad relativa secuencial de las anchuras de anillos. El valor de la sensibilidad media tiene un rango entre 0, cuando no existen diferencias de anchura entre anillos adyacentes, a 2, cuando los anillos alternan (teóricamente) entre un valor de 0 y un valor positivo (Fritts, 2001). La intercorrelación entre series es el promedio de los

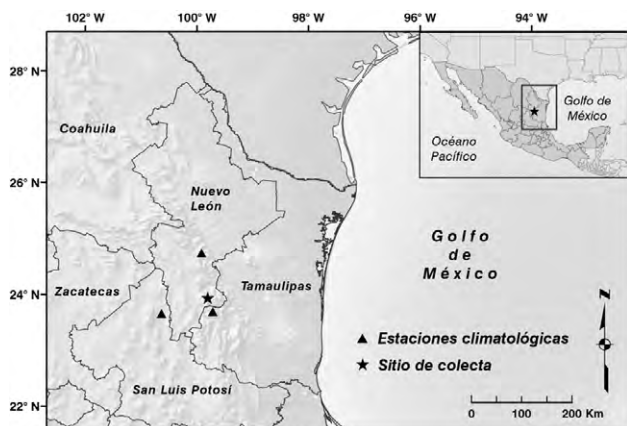


Figura 1. Localización del sitio de muestreo (estrella) y las 3 estaciones climatológicas (triángulos).

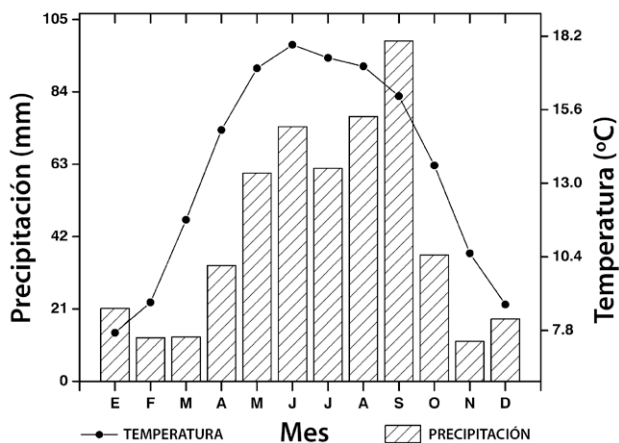


Figura 2. Climodiagrama, mostrando la temperatura media y precipitación mensual acumulada, basada en el promedio de las 3 estaciones climatológicas Iturbide, Matchuala, y Uvalles (tabla 1).

coeficientes de correlación individuales de cada serie de anillos de un núcleo de crecimiento con la cronología de sitio, y puede tomar valores desde 0 hasta 1 (Speer, 2010). La variación del primer componente principal de las series es el porcentaje de variación común de crecimiento de todas las muestras que conforman la cronología para un intervalo común, y puede tomar valores de 0 a 100%. Estos 2 últimos estadísticos son indicadores de la robustez del fechado de las series de anillos y de la señal común de crecimiento presente entre árboles.

La relación entre el clima y los índices de crecimiento se estudió a través de un análisis de correlación (Blasing et al., 1984; Fritts, 2001). Este método consiste en correlacionar la cronología de sitio con los registros climáticos de forma secuencial, generalmente con coeficientes de correlación de Pearson. Los análisis de correlación se llevaron a cabo con el programa computacional Minitab versión 18. El análisis se realizó con variables climáticas del año actual y del año anterior a la formación de los anillos de crecimiento, debido a que el crecimiento de los árboles está influido por las condiciones climáticas del año actual y de años previos. En este estudio, los índices de crecimiento fueron relacionados con registros mensuales de precipitación, así como temperatura máxima y mínima. Es decir, se abarcó de enero del año anterior de crecimiento a diciembre del año actual (24 meses).

Para el análisis clima-crecimiento se emplearon datos de las 3 estaciones más cercanas con registros extensos y completos; en este caso fueron Iturbide en Nuevo León, Uvalles en Tamaulipas y Matehuala en San Luis Potosí. Los registros de las 3 estaciones fueron promediados para generar un registro regional para el periodo de 1961 al 2000 (tabla 1). El promediar los registros de clima permite disminuir el ruido de baja amplitud e incrementar la relación entre el crecimiento de los árboles y el clima (Blasing et al., 1981). Los datos de las 3 estaciones fueron proporcionados directamente por el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua, en la Ciudad de México.

La relación con el clima regional se evaluó por medio de la creación de campos de correlación entre cada una de las cronologías de las 4 especies y los datos climáticos mensuales de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Un campo de correlación consiste en

la representación espacial de los coeficientes de correlación entre el crecimiento arbóreo (cronología) y cada uno de los puntos de una malla homogénea de datos climáticos. El periodo de análisis para los campos de correlación se estableció a partir del periodo estacional de mayor correlación, entre la cronología y el clima promedio de las 3 estaciones. En la creación de campos de correlación se empleó el conjunto de datos climáticos CRU TS (versión 3.2), desarrollado por la Unidad de Investigación Climática de la Universidad del Este de Anglia (Inglaterra). Este conjunto de datos consiste en series de tiempo mensuales de clima, interpoladas a una malla homogénea de puntos con una resolución de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (Mitchell y Jones, 2005).

Se analizó la relación entre el crecimiento de las 4 especies de Peña Nevada y fenómenos climatológicos a gran escala, como los fenómenos de ENSO y ODP. Diversos estudios han señalado la alta influencia que dichos fenómenos ejercen sobre la variabilidad climática a nivel interanual e interdecadal en todo el país (Méndez y Magaña, 2010; Pavia et al., 2006; Seager et al., 2009). Este análisis consistió en correlacionar los índices de crecimiento anual (cronologías) de cada especie, con los índices climatológicos de El Niño (en la región 4) y de la ODP. El periodo de análisis fue de 1950 a 2000 en una ventana de 24 meses; es decir, se abarcó de enero del año anterior de crecimiento a diciembre del año actual. El índice de El Niño en la región 4 se define como las anomalías de temperatura superficial del océano Pacífico ecuatorial entre los  $5^\circ$  S,  $5^\circ$  N y los  $160^\circ$  E,  $150^\circ$  O (Trenberth, 1997). El Índice de la ODP se define como la variabilidad del primer componente principal de la temperatura superficial del océano Pacífico, al norte de los  $20^\circ$  N para el periodo de 1900 - 1993 (Mantua et al., 1997). Los datos de todos los índices fueron obtenidos de la Librería de Datos Climáticos IRI/LDEO de la Universidad de Columbia (EUA; <http://iridl.ldeo.columbia.edu/index.html>). La influencia de fenómenos climatológicos a gran escala en el clima regional se analizó por medio de campos de correlación entre los índices Niño 4 y ODP con registros mensuales de precipitación, así como temperatura máxima y mínima. El periodo de análisis fue de 1961 a 2000 para los meses de noviembre del año anterior de crecimiento a mayo del año actual.

Tabla 1

Origen de los datos meteorológicos utilizados en el promedio regional para el análisis de correlación

| Estación climatológica     | Latitud ( $^\circ$ N) | Longitud ( $^\circ$ O) | Elevación (m) | Periodo de registro |
|----------------------------|-----------------------|------------------------|---------------|---------------------|
| Iturbide, Nuevo León       | 24.73                 | -99.91                 | 1780          | 1947-2000           |
| Uvalles, Tamaulipas        | 23.68                 | -99.71                 | 1565          | 1961-2000           |
| Matehuala, San Luis Potosí | 23.65                 | -100.63                | 1615          | 1940-2000           |

Se analizó la relación espacial entre el crecimiento de las 4 especies en Peña Nevada y el crecimiento de diversas coníferas en México y el sur de los EUA. Este análisis consistió en correlacionar cada una de las cronologías generadas en el sitio de estudio, con cronologías disponibles en el Banco Internacional de Anillos de Crecimiento Arbóreos (NOAA, 2006; <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>), cronologías generadas por el Dr. José Villanueva del CENID-RASPA (INIFAP en Gómez Palacio, Durango) y algunas generadas por el primer autor de este trabajo. El análisis incluyó un total de 113 cronologías para un periodo que abarcó de 1950 a 1985. Este periodo se seleccionó debido a que muchas cronologías en EUA fueron realizadas en los años ochenta y existen menos registros para llevar a cabo el análisis en un periodo más reciente.

## Resultados

Los anillos de las 4 especies presentan el patrón característico de coníferas: madera clara con traqueidas de pared delgada, a la que se le denomina madera temprana, y la madera oscura con traqueidas de pared gruesa, a la que se denomina madera tardía (fig. 3). Los anillos de *Abies vejarii* y *Pinus strobiformis* presentaron una menor proporción de madera tardía con respecto a la anchura total de los anillos, en comparación con los de *Pinus hartwegii* y *Pinus teocote*.

Los periodos de las cronologías en 3 especies son de al menos 100 años, a excepción de *Pinus strobiformis* que presenta 98. Todas las cronologías mostraron una alta variación interanual e interdecadal (fig. 4), siendo evidentes los periodos de bajo crecimiento (en rojo) a inicios de las décadas de los años 30, 50 y 70. En 3 de las especies analizadas se presentó el fenómeno de anillos ausentes, siendo la excepción *Pinus strobiformis*. Se presentaron 3 anillos ausentes en *Abies vejarii* (0.37% de 793 anillos), 3 en *Pinus hartwegii* (0.31% de 953) y 2 en *Pinus teocote* (0.26% de 772 anillos). Los años en que no se formaron

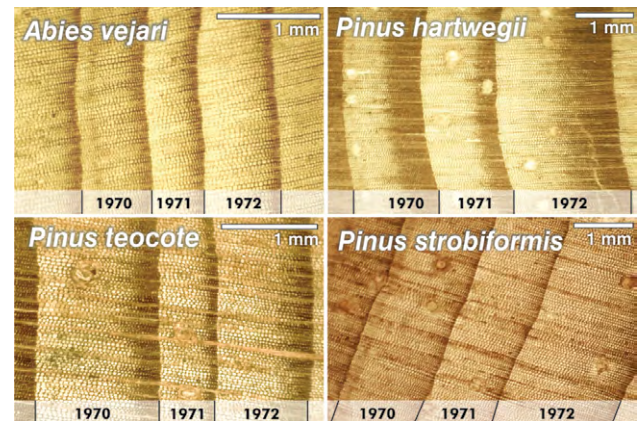


Figura 3. Anillos de crecimiento de *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pinus teocote*.

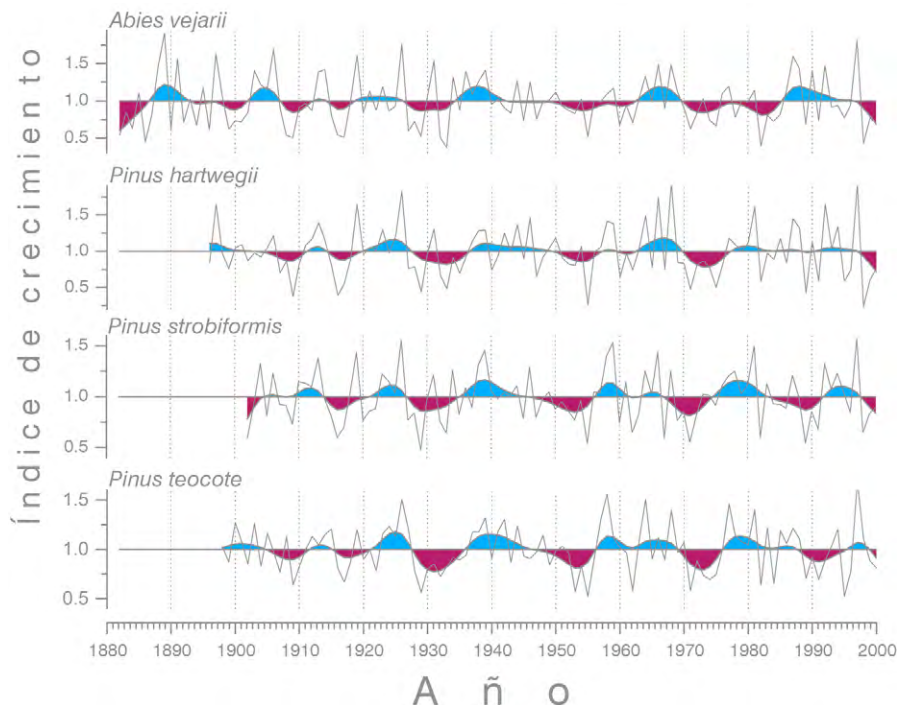


Figura 4. Cronología de residuos de *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pinus teocote*. La línea en el centro es un “smoothing spline” de 10 años, ajustado a la cronología para acentuar la variación decadal (Cook y Peters, 1981). Las zonas en color marrón y azul indican periodos de crecimiento bajo y alto, respectivamente.

anillos de crecimiento fueron 1909, 1933, 1955 y 1971. Los parámetros estadísticos de las 4 especies indican potencial para estudios dendrocronológicos futuros (tabla 2). Los valores de sensibilidad media fueron superiores a 0.2 en las 4 especies, lo que indica suficiente variación interanual para estudios de reconstrucción del clima (Speer, 2010). La autocorrelación de primer orden resultó ser baja en 3 de las 4 especies analizadas, lo cual indica que el crecimiento en un año no está condicionado por factores del año anterior. En *Pinus teocote* la autocorrelación fue de 0.45 ( $p \leq 0.001$ ), lo que indica la presencia de algún condicionamiento en el crecimiento presente por factores del año anterior. La variación promedio del primer componente principal en las 4 especies fue de 62.7%, y la intercorrelación entre series de 0.68. Estos valores indican la presencia de una fuerte señal común de crecimiento en los árboles de las cuatro especies. Tres cronologías poseen un número adecuado de muestras, ya que 3 de ellas presentaron valores de la señal expresada de población (SEP) superiores a 0.85, y en caso de *Pinus teocote* de 0.82.

Los resultados de análisis de correlación entre el clima y el crecimiento indican una asociación positiva con la precipitación mensual desde noviembre del año anterior hasta mayo del año actual. La mayor correlación ocurrió en el periodo noviembre-abril en *Abies vejarii* ( $r = 0.64$ ,  $n = 40$  años,  $p = 8.7 \cdot 10^{-6}$ ), enero-mayo en *Pinus hartwegii* ( $r = 0.84$ ,  $p = 1.2 \cdot 10^{-11}$ ) y *Pinus strobiformis* ( $r = 0.7$ ,  $p = 5.0 \cdot 10^{-7}$ ), así como noviembre-abril en *Pinus teocote* ( $r = 0.52$ ,  $p = 5.8 \cdot 10^{-4}$ ) (fig. 5). A diferencia de las demás especies, *Pinus teocote* presentó un menor valor en la correlación crecimiento-precipitación en enero del año actual de crecimiento ( $r = 0.04$ ). En las 4 especies, el valor de correlación máxima se presentó con la precipitación en el mes de abril (fig. 5). Los campos de correlación mostrados en la figura 6 indican una fuerte relación entre

el crecimiento de las 4 especies con la precipitación del periodo noviembre-mayo en la parte este y centro del norte de México, extendiéndose la relación al norte a los estados de Texas y Nuevo México, en EUA.

La temperatura máxima influyó negativamente en el crecimiento radial de las cuatro especies analizadas (fig. 5). En general, el crecimiento es afectado por la temperatura máxima promedio de los meses de octubre del año anterior de crecimiento a junio del año actual. Las mayores correlaciones entre el crecimiento y la temperatura máxima ocurrieron en el periodo de diciembre-mayo en *Abies vejarii* ( $r = -0.62$ ,  $p = 2.0 \cdot 10^{-5}$ ), enero-mayo en *Pinus hartwegii* ( $r = -0.62$ ,  $p = 2.0 \cdot 10^{-5}$ ) y *Pinus strobiformis* ( $r = -0.56$ ,  $p = 1.7 \cdot 10^{-4}$ ), y noviembre-mayo en *Pinus teocote* ( $r = -0.49$ ,  $p = 0.0013$ ) (fig. 5). De forma similar que con la precipitación, el crecimiento de las 4 especies muestra el valor máximo de correlación con la temperatura máxima en el mes de abril (fig. 5). Los campos de correlación indican una fuerte relación del crecimiento con la temperatura máxima del periodo noviembre-mayo en casi todo el territorio mexicano, extendiéndose al estado de Texas en los EUA (fig. 7). La relación entre el crecimiento y la temperatura mínima resultó ser baja en las cuatro especies (fig. 5), presentándose en ningún caso correlaciones significativas.

El análisis de correlación con los índices climáticos a gran escala reveló una influencia mensual positiva de los fenómenos de El Niño y la ODP en el crecimiento de las 4 especies analizadas (fig. 8). Las relaciones positivas con ambos índices muestran que el crecimiento de las 4 especies en el sitio de estudio es promovido por condiciones de calentamiento de la zona norte y ecuatorial del Océano Pacífico. Las correlaciones positivas se presentan generalmente en las 4 especies de inicio del verano del año anterior a finales del otoño del año actual (fig. 8).

Tabla 2

Estadísticas descriptivas de las cronologías residuales, generadas por ARSTAN

|                              | <i>Abies vejarii</i> | <i>Pinus hartwegii</i> | <i>Pinus strobiformis</i> | <i>Pinus teocote</i> |
|------------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|
| Intervalo de tiempo          | 1881-2000            | 1895-2000              | 1902-2000                 | 1897-2000            |
| Número de árboles (núcleos)  | 5 (10)               | 5 (10)                 | 5 (10)                    | 5 (8)                |
| Anchura media de anillo (mm) | 2.40                 | 2.13                   | 2.93                      | 1.63                 |
| Sensibilidad media           | 0.38                 | 0.41                   | 0.30                      | 0.27                 |
| APO                          | 0.21                 | 0.03                   | 0.14                      | 0.45                 |
| VPC (%)                      | 68.21                | 64.31                  | 67.17                     | 51.12                |
| ICES                         | 0.67                 | 0.76                   | 0.75                      | 0.55                 |
| SEP                          | 0.87 (5/10)          | 0.87 (5/10)            | 0.89 (5/10)               | 0.82 (5/8)           |

Nota: APO = autocorrelación de primer orden, calculado antes del modelado autoregresivo; VPC = variación del primer componente principal; ICES = intercorrelación entre series; SEP = señal expresada de población (número de árboles / número de muestras).

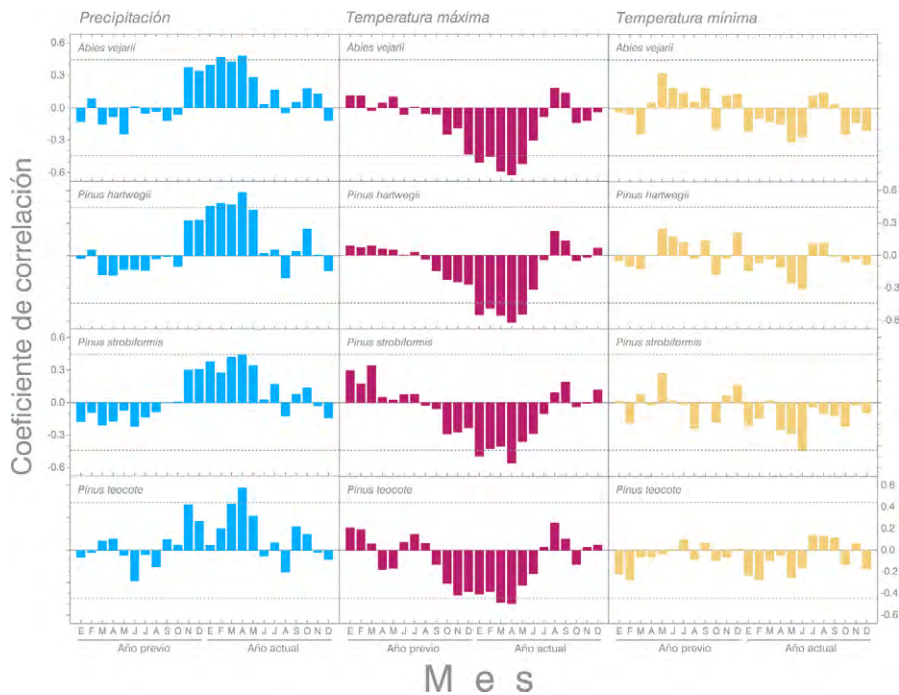


Figura 5. Coeficiente de correlación de Pearson de los índices de crecimiento (cronología de residuos) con datos climáticos promediados de las 3 estaciones climatológicas 1961-2000, por especie (precipitación en barras azules, temperatura máxima en barras marrón y temperatura mínima en barras amarillas). Las líneas discontinuas indican un valor umbral de  $r = 0.443$  para significancia a una probabilidad de  $\alpha = 0.05$ , ajustado según el método de Bonferroni para 24 comparaciones simultáneas ( $\alpha_{aj.} = 0.05/24 = 0.00208$ ).

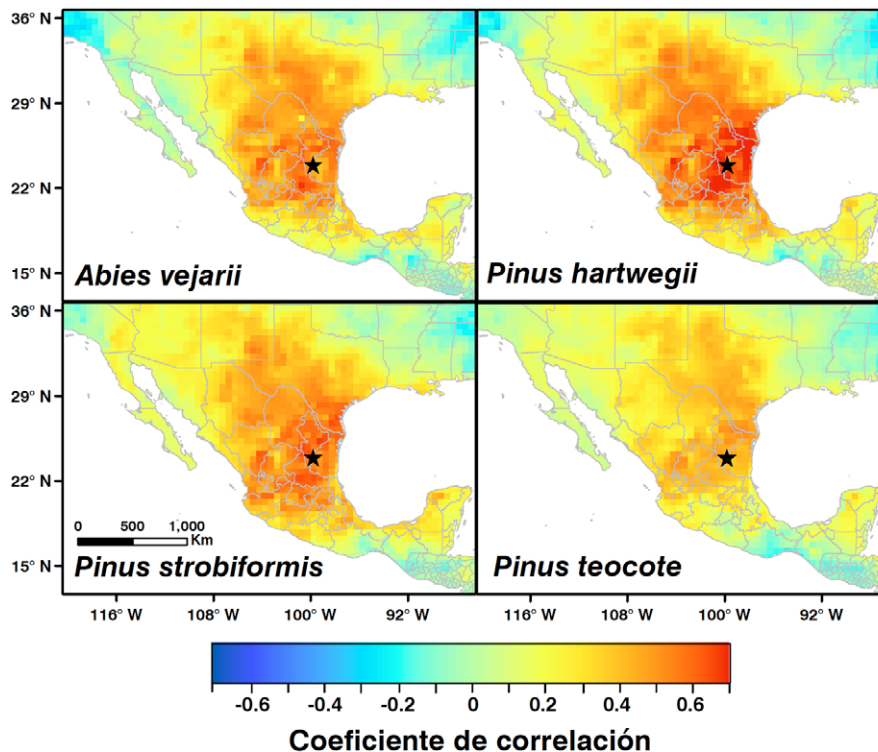


Figura 6. Campos de correlación entre los índices de crecimiento (cronología de residuos) con la precipitación total de noviembre a mayo 1961-2000, por especie. El símbolo de estrella en color negro indica el sitio de muestreo en la sierra de San Antonio Peña Nevada.

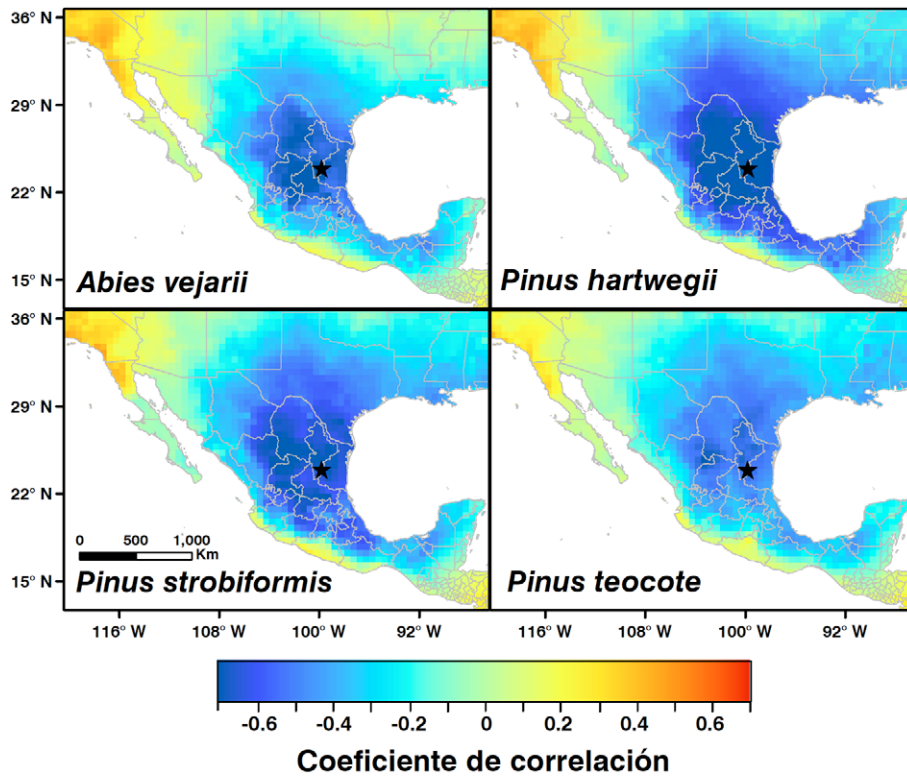


Figura 7. Campos de correlación entre los índices de crecimiento (cronología de residuos) con la temperatura máxima total de noviembre a mayo 1961-2000, por especie. El símbolo de estrella en color negro indica el sitio de muestreo en la sierra de San Antonio Peña Nevada.

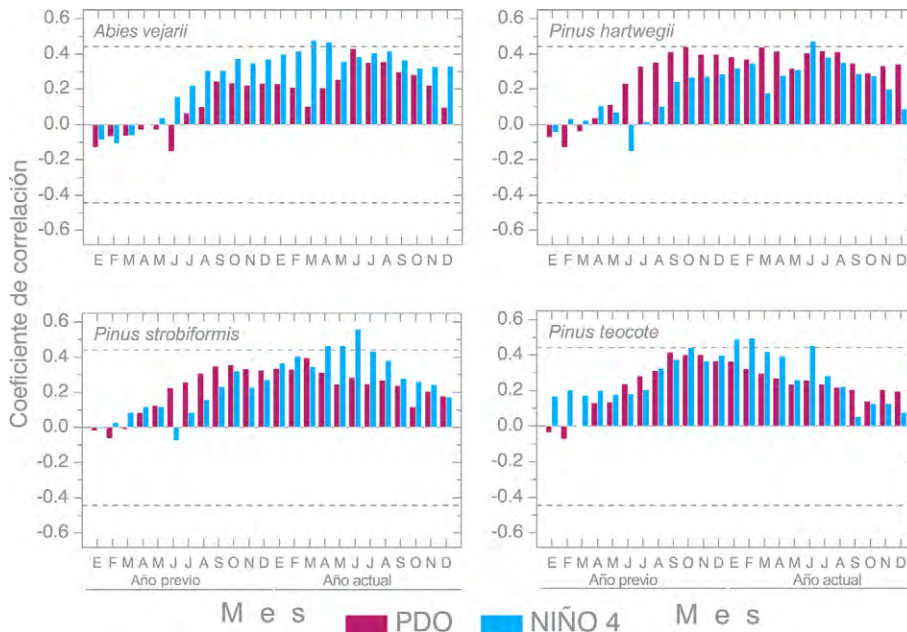


Figura 8. Coeficiente de correlación de Pearson de los índices de crecimiento con los índices de fenómenos climatológicos a gran escala 1961-2000, por especie (la ODP en barras marrón, El Niño región 4 en barras azules). Las líneas discontinuas indican un valor umbral de  $r = 0.443$  para significancia a una probabilidad de  $\alpha = 0.05$ , ajustado según el método de Bonferroni para 24 comparaciones simultáneas ( $\alpha_{aj} = 0.05/24 = 0.00208$ ).



Los campos de correlación entre los índices climatológicos a gran escala y el clima regional revelan una relación positiva de ENSO y ODP con la precipitación regional del norte de México (fig. 9). Inversamente, ambos fenómenos climatológicos se relacionan de forma negativa con la temperatura máxima promedio principalmente del noreste de México y sureste de los EUA (fig. 9). En general se pueden observar mayores valores de correlación con El Niño que con la ODP, tanto en la precipitación como en la temperatura. En el caso de la precipitación, los campos indican mayor correlación espacial con El Niño que con la ODP.

Las 4 cronologías desarrolladas para la sierra de San Antonio Peña Nevada se correlacionan de manera positiva con diversas cronologías del norte y en algunos casos del centro de México (fig. 10). Los mayores valores de correlación se presentaron en cronologías localizadas en zonas de alta montaña, tanto en la sierra Madre Oriental como en la sierra Madre Occidental. En particular, se presentaron en la cronología "La Viga" en la especie *Pseudotsuga menziesii*, localizada en la sierra de Arteaga y al sureste del estado de Coahuila (Cerano-Paredes et al., 2011). Con *Pinus hartwegii* ( $r = 0.59$ ,  $n = 37$  años,  $p$

$= 1.2 \cdot 10^{-4}$ ), *Pinus strobiformis* ( $r = 0.54$ ,  $p = 5.6 \cdot 10^{-4}$ ) y *Pinus teocote* ( $r = 0.65$ ,  $p = 1.3 \cdot 10^{-5}$ ). En el caso de *Abies vejarii*, la mayor correlación se presentó con la cronología "Sierra de Jimulco" en *Pinus cembroides*, al suroeste de Coahuila ( $r = 0.54$ ,  $p = 5.6 \cdot 10^{-4}$ ).

## Discusión

Se lograron fechar 38 de los 40 núcleos analizados. En 2 árboles de *Pinus teocote* no se logró identificar los límites entre anillos, lo que imposibilitó el fechado de los núcleos. La proporción de anillos ausentes encontrada en 3 de las 4 especies es similar a la reportada en *Pseudotsuga menziesii* en 2 localidades cercanas al sitio de este trabajo: El Potosí con 0.3% y Las Bateas con 0.2% (NOAA, 2006). El fenómeno de anillos ausentes en zonas subtropicales áridas (por ejemplo, en el norte de México) ocurre típicamente cuando un árbol experimenta condiciones extremas de estrés hídrico (Fritts, 2001). Esta afirmación se confirmó, ya que los años en que no se formaron anillos de crecimiento, corresponden a eventos de sequías extremas, documentadas en el norte del país, tanto en registros históricos (Castorena y Florescano, 1980; Contreras-Servín, 2005), como en reconstrucciones

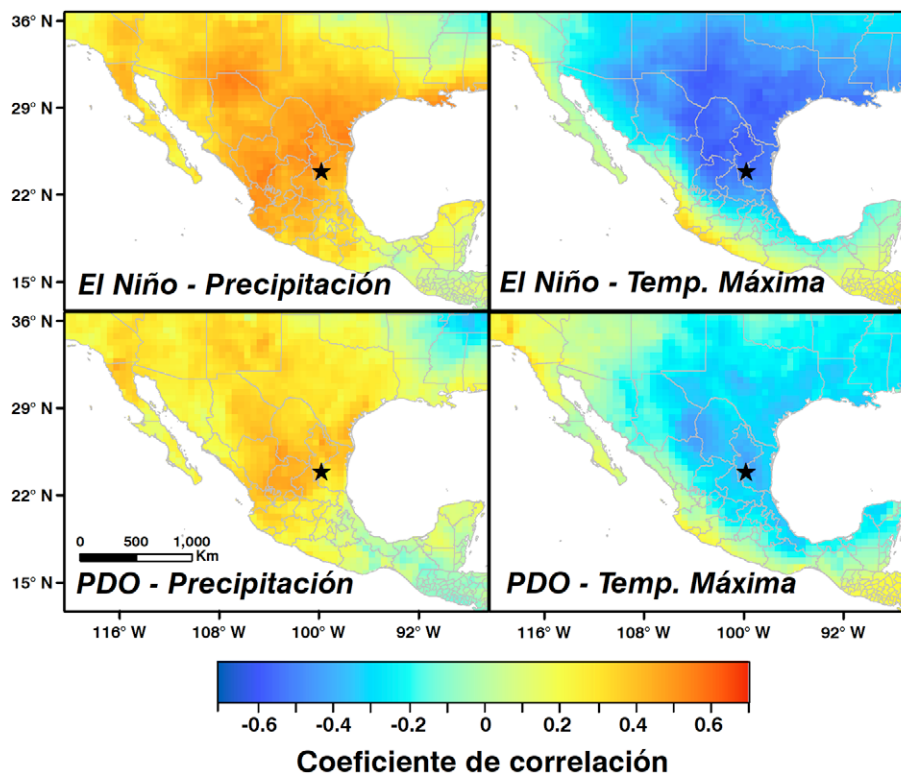


Figura 9. Campos de correlación de los índices climatológicos El Niño región 4 (parte superior) y ODP (parte inferior) para el periodo noviembre-mayo con la precipitación (parte izquierda de la figura) y temperatura máxima (parte derecha) para el periodo noviembre-febrero 1901-2013. El símbolo de estrella en color negro indica el sitio de muestreo en la sierra de San Antonio Peña Nevada.

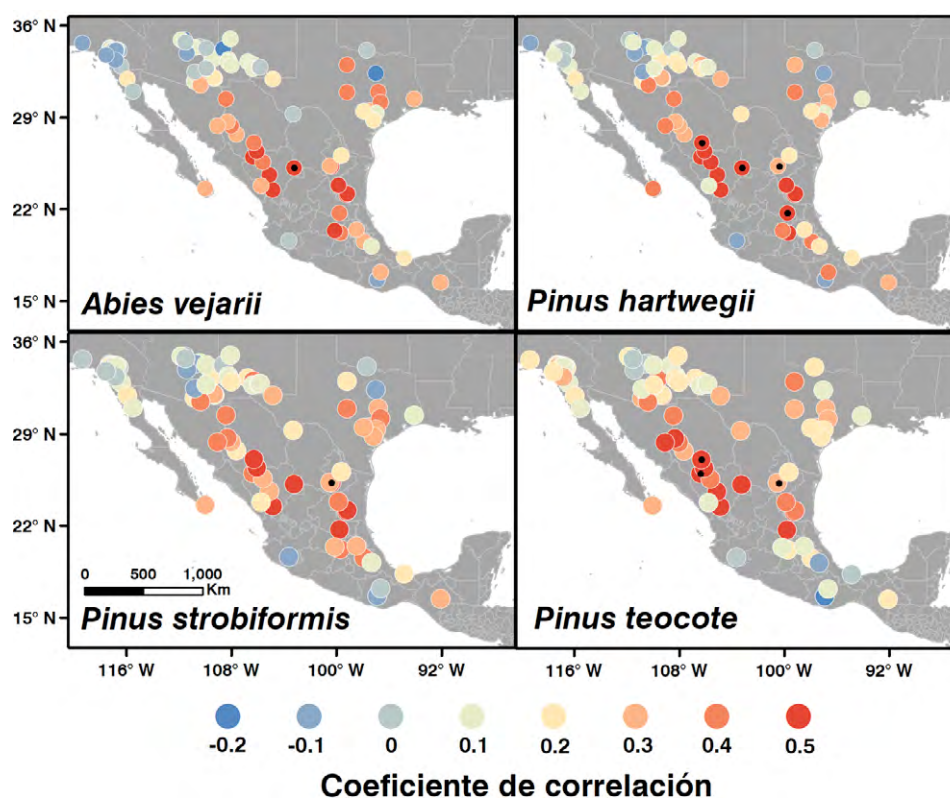


Figura 10. Correlación de Pearson entre índices de crecimiento (cronología de residuos) de *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pinus teocote* con los índices de crecimiento de distintas coníferas en México y sur de los EUA. El periodo de análisis fue de 1949-1985. Los puntos en color negro dentro de los círculos indican correlaciones estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ).

con anillos de crecimiento (Constante-García et al., 2009; González-Elizondo et al., 2005; Villanueva-Díaz et al., 2005, 2007).

Los parámetros estadísticos de las cronologías en las 4 especies indican potencial para realizar estudios dendrocronológicos subsecuentes. El valor de sensibilidad media de las 4 especies es similar al reportado para diferentes especies de coníferas en sitios de alta montaña en la sierra Madre Oriental (Villanueva-Díaz et al., 2007; Villanueva-Díaz, Fule et al., 2009). Sin embargo, resulta ser menor si se compara con sitios de mayor aridez en México y EUA, donde alcanzan valores superiores a 0.5 (Fritts, 2001; Santillán-Hernández et al., 2010). A pesar del carácter prospectivo de este trabajo, los valores de señal expresada de la población indican un número suficiente de muestras para obtener una señal común de crecimiento en las 4 especies. Sin embargo, es deseable en subsecuentes estudios incrementar el número de muestras, utilizando árboles longevos y tocones para extender las cronologías al pasado.

Los resultados del análisis clima-crecimiento indican que el crecimiento de las 4 especies esta principalmente

regulado y limitado por la disponibilidad de humedad. En este caso, un déficit hídrico puede inhibir diferentes aspectos del crecimiento del cambium vascular. Por ejemplo, en condiciones de baja humedad, se disminuye el tamaño y diferenciación de los derivados del cambium, así como la tasa de división de las células fusiformes iniciales, y células madre de xilema y floema (Kozłowski y Pallardy, 1997). La respuesta positiva a la precipitación en el periodo estacional invierno-primavera es común en la mayoría de especies de coníferas en México y el sur de los EUA (Cerano-Paredes et al., 2014; St. George et al., 2010; Villanueva-Díaz et al., 2007). A continuación, se discute la respuesta climática encontrada en la sierra de San Antonio Peña Nevada, a la luz de estudios relacionados con aspectos fisiológicos y la actividad del cambium vascular.

Es posible deducir con base en los resultados de estudios de actividad cambial (Bernal-Salazar, 2004) y de crecimiento (Biondi et al., 2005) realizados en el país, que la producción de madera de los árboles en el área de estudio inicie en el periodo marzo-abril. Este periodo de inicio de crecimiento coincide con el comienzo de la época de lluvias en la sierra de San Antonio Peña Nevada. La importancia

de la humedad, durante el inicio de crecimiento en las 4 especies analizadas, se manifiesta en los altos valores de correlación alcanzados con los registros de precipitación y temperatura máxima en el periodo marzo-abril. En etapas de máxima actividad cambial, la baja disponibilidad de humedad afecta negativamente el crecimiento de los árboles, debido a una disminución en el transporte de fotosintatos a la zona cambial (Dünisch y Bauch, 1994) y de la incorporación de unidades de glucosa en la pared celular de las traqueidas en diferenciación (Whitmore y Zahner, 1967).

A pesar de que la formación de madera pudiera estar iniciando en torno al periodo marzo-abril, el crecimiento de las 4 especies responde positivamente a la precipitación previa a la época de crecimiento, es decir, 4 meses antes, a partir del mes de noviembre del año anterior. Diversos estudios realizados en distintas especies de coníferas indican que el crecimiento en la base de un árbol (tallo y raíces) depende principalmente de los fotosintatos acumulados en la estación de invierno previa al inicio de la época de crecimiento (Fritts, 2001; Pallardy y Kozłowski, 2008). Además, la precipitación en la época fría se presenta habitualmente en eventos prolongados de baja intensidad, lo que favorece la infiltración de agua en el subsuelo (Seiler y Gat, 2007). Esta infiltración es favorecida por la escasa evaporación, producto de las bajas temperaturas prevalentes en el invierno.

Existen estudios que indican que la precipitación invernal es la principal fuente de recarga de agua subterránea (Dutton et al., 2005; Tang y Feng, 2001), a la que preferencialmente acceden árboles adultos en bosques templados por medio de raíces profundas (Dawson, 1996; Kerhoulas et al., 2013). Las nevadas representan otro fenómeno climatológico frecuente en los sitios de alta montaña, el cual favorece la infiltración del agua al suelo durante el periodo invernal (Sánchez et al., 2003). Esta fuente de humedad llega ser vital para los árboles, debido a que el agua proveniente del derretimiento de nieve puede mantenerse hasta la estación cálida, proporcionando agua a los árboles durante el verano cuando la demanda evaporativa se incrementa (Molotch et al., 2009; Pataki et al., 2000). En las Montañas Rocosas de Colorado en los EUA, se ha reportado que durante el mes de agosto (verano), el 60% del agua transportada por el xilema puede provenir del derretimiento de nevadas en (Hu et al., 2010). La dependencia al agua invernal podría explicar la ausencia de correlación del crecimiento con los meses de verano e inicio de otoño, paradójicamente cuando el sitio de estudio presenta la mayor cantidad de lluvia del año. Esto puede atribuirse a que la mayoría de fotosintatos producidos durante la época de lluvias se destina al crecimiento de copa y no al crecimiento en diámetro del tronco (Fritts, 2001).

Los resultados del análisis clima-crecimiento indicaron una respuesta negativa del crecimiento radial a la temperatura máxima. Esta correlación negativa, en casi el mismo periodo de respuesta al de la precipitación (noviembre-mayo), respaldarían la hipótesis de una afectación por estrés hídrico. Las altas temperaturas pueden afectar negativamente la cantidad de carbohidratos disponibles, destinados a crecimiento arbóreo. Por un lado, un incremento en la temperatura puede originar una disminución en la producción de carbohidratos, cuando los árboles en condiciones de alta evapotranspiración capturan menos CO<sub>2</sub> al cerrar sus estomas, para evitar la pérdida de agua (Kozłowski y Pallardy, 1997). Por otro lado, altas temperaturas pueden incrementar la tasa de respiración, lo que implicaría una movilización y agotamiento de las reservas de carbohidratos (Huxman et al., 2003; Kozłowski y Pallardy, 1997). La respuesta del crecimiento arbóreo a temperaturas máximas encontradas aquí en la sierra de San Antonio Peña Nevada, se ha reportado en diversos estudios en México y en los EUA (Adams y Kolb, 2005; Correa-Díaz et al., 2014; González-Elizondo et al., 2005; Pompa-García et al., 2013).

La influencia positiva de los fenómenos de El Niño y la ODP sobre el crecimiento arbóreo, encontrada en el presente trabajo, es similar a la reportada en diversos estudios en el norte de México y sur de los EUA (D'Arrigo et al., 2001; Margolis, 2007; St. George et al., 2010; Villanueva-Díaz et al., 2015). Los valores positivos (fases cálidas) de ambos fenómenos favorecen las condiciones de mayor humedad y bajas temperaturas durante el periodo invierno-primavera en el norte del país (Magaña et al., 2003; Mantua y Hare, 2002). Además, cuando ambos fenómenos se encuentran en fase, es decir, con valores positivos o negativos al mismo tiempo, la ODP intensifica las anomalías climáticas ocasionadas por El Niño (Gershunov y Barnett, 1998). Las fases cálidas de la ODP originan condiciones de mayor humedad en el norte del país, ya que durante dichas fases se incrementa la ocurrencia de eventos cálidos de El Niño (Verdon y Franks, 2006). La relación entre el crecimiento de las 4 especies analizadas con otras coníferas en el norte de México, se debe a la influencia que ejerce El Niño y la ODP sobre las condiciones climáticas en el norte del país. Ambos fenómenos regulan la coherencia espacial del clima en el periodo estacional noviembre-marzo en una gran parte del norte de México. Esta coherencia del clima en el norte del país se manifiesta de igual forma como coherencia en el crecimiento arbóreo en diversas especies de coníferas. Lo anterior ocurre debido a que numerosas especies arbóreas responden a la precipitación y la temperatura en diversos meses del periodo estacional noviembre-marzo.

Los resultados del presente estudio mostraron que el crecimiento radial del tronco en las 4 especies analizadas

está fuertemente influenciado por el clima. El quinto reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático proyecta para las regiones subtropicales, como el norte de México, mayores condiciones de aridez, debido a una menor precipitación y un aumento de la temperatura (IPPC, 2013). Esta condición de déficit hídrico futuro afectará negativamente el crecimiento de los árboles de coníferas que habitan la sierra de San Antonio Peña Nevada. Esta predicción ha sido descrita también en el estudio de Ricker et al. (2007).

### Agradecimientos

A la Dirección General de Estudios de Posgrados de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la beca otorgada al primer autor, con la cual la realización del presente trabajo fue posible. También agradecemos la ayuda proporcionada por Rubén Pérez del Instituto de Ecología, UNAM (Ciudad de México) y por José Villanueva CENID-RASPA (INIFAP en Gómez Palacio, Durango), por permitir el uso de la platina de fase deslizante para realizar las mediciones de anillos. A Alejandro Zubiate y Armando Jiménez de la Universidad Autónoma de Nuevo León (San Nicolás de los Garza, Nuevo León) por el apoyo brindado en la colecta de datos en campo.

### Referencias

- Adams, H. D. y Kolb, T. E. (2005). Tree growth response to drought and temperature in a mountain landscape in northern Arizona, USA. *Journal of Biogeography*, 32, 1629–1640.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M. et al. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684.
- Allende, T. C., Mendoza, M. E., Salicrup, D. R. P., Villanueva-Díaz, J. y Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103–116.
- Amaro-Sánchez, A. (2012). *Reconstrucción de precipitación invierno-primavera en base a Pinus douglasiana en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco (Tesis)*. División de Agronomía, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coahuila, México.
- Bernal-Salazar, S. (2004). *El papel de las variables ambientales y los contaminantes atmosféricos en la actividad cambial (Tesis doctoral)*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.
- Biondi, F., Hartsough, P. C. y Galindo-Estrada, I. (2005). Daily weather and tree growth at the tropical treeline of North America. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37, 16–24.
- Blasing, T. J., Duvick, D. N. y West, D. C. (1981). Calibration and verification using regionally averaged single station precipitation data. *Tree-Ring Bulletin*, 41, 37–44.
- Blasing, T. J., Solomon, A. M. y Duvick, D. N. (1984). Response functions revisited. *Tree-Ring Bulletin*, 44, 1–15.
- Boisvenue, C. y Running, S. W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 12, 862–882.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320, 1444–1449.
- Briffa, K. (1995). Interpreting high-resolution proxy climate data. The example of dendroclimatology. En H. Von-Storch y A. Navarra (Eds.), *Analysis of climate variability, applications of statistical techniques* (pp. 77–94). Nueva York: Springer.
- Castorena, G. y Florescano, E. (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Vázquez-Selem, L., Trucios-Caciano, R. y Guerra-de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 42–55.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Cornejo-Oviedo, E., Sánchez-Cohen, I. y Constante-García, V. (2011). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2, 31–45.
- Chmielewski, F. M. y Rötzer, T. (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101–112.
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E. y Valencia-Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34, 17–39.
- Contreras-Servín, C. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, 56, 118–133.
- Cook, E. R. (1985). *A time series analysis approach to tree ring standardization (Tesis doctoral)*. University of Arizona, Tucson, EUA.
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37–59.
- Cook, E. R. y Kairiukstis, L. A. (1990). *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Dordrecht, Países Bajos: Kluwer.
- Cook, E. R. y 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.
- Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Castreita-Esparza, U., Martínez-Trinidad, T. y Cervantes-Martínez, R. (2014). Análisis dendroclimático de ahuehuete

- (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el centro de México. *Agrociencia*, 48, 537–551.
- D'Arrigo, R., Villalba, R. y Wiles, G. (2001). Tree-ring estimates of Pacific decadal climate variability. *Climate Dynamics*, 18, 219–224.
- Dawson, T. E. (1996). Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift. *Tree Physiology*, 16, 263–272.
- Dünisch, O. y Bauch, J. (1994). Influence of soil substrate and drought on wood formation of spruce (*Picea abies* [L.] Karst) under controlled conditions. *Holzforschung*, 48, 447–457.
- Dutton, A., Wilkinson, B. H., Welker, J. M., Bowen, G. J. y Lohmann, K. C. (2005). Spatial distribution and seasonal variation in  $^{18}O/^{16}O$  of modern precipitation and river water across the conterminous USA. *Hydrological Processes*, 19, 4121–4146.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2015). *Global Forest Resources Assessment 2015 - Main report*. Roma: Food Agricultural Organization of the United Nations.
- Fritts, H. C. (2001). *Tree rings and climate*. Caldwell, New Jersey: The Blackburn Press.
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gershunov, A. y Barnett, T. P. (1998). Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2715–2726.
- GISTEMP. (2017). GISTEMP Team 2017 GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Navar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva-Díaz, J., Aguirre, O. et al. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681-2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213, 39–53.
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57, 205–221.
- Gutiérrez-García, G. (2017). *Determinación taxonómica y análisis de crecimiento de especies forestales económicamente importantes para el aprovechamiento forestal sustentable e identificación de eventos climáticos extremos (sequías) en virutas procedentes de Inventario Nacional Forestal y de Suelos de los años 2013, 2014, y 2015*. Ciudad de México: Reporte Técnico, FMCN-CONAFOR-USFS. DOI:10.13140/RG.2.2.32677.55524
- Hassan, R. M., Scholes, R. J. y Ash, N. (2005). *Ecosystems and human well-being: Current State and Trends, Volume 1*. Washington D.C.: Island Press.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78.
- Hu, J. I. A., Moore, D. J. P., Burns, S. P. y Monson, R. K. (2010). Longer growing seasons lead to less carbon sequestration by a subalpine forest. *Global Change Biology*, 16, 771–783.
- Huxman, T. E., Turnipseed, A. A., Sparks, J. P., Harley, P. C. y Monson, R. K. (2003). Temperature as a control over ecosystem  $CO_2$  fluxes in a high-elevation, subalpine forest. *Oecologia*, 134, 537–546.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). *Climate Change 2013. The physical science basis. Contribution of working group I to the IPCC Fifth Assessment Report*. En T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner et al. (Eds.), *Contribution of working group I to the IPCC Fifth Assessment Report* (pp. 1535). New York: Cambridge University Press.
- Kerhoulas, L. P., Kolb, T. E. y Koch, G. W. (2013). Tree size, stand density, and the source of water used across seasons by ponderosa pine in northern Arizona. *Forest Ecology and Management*, 289, 425–433.
- Kozłowski, T. T. y Pallardy, S. G. (1997). *Growth control in woody plants*. San Diego: Academic Press.
- MacDicken, K., Jonsson, Ö., Piña, L., Maulo, S., Contessa, V. y Adikari, Y. (2016). *Global forest resources assessment 2015: how are the world's forests changing?* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L. y Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42, 313–330.
- Mantua, N. J. y Hare, S. R. (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 58, 35–44.
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M. y Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069–1079.
- Margolis, E. (2007). *Fire history and fire-climate relationships in upper elevation forests of the southwestern United States (Tesis doctoral)*. University of Arizona. Tucson, EUA.
- Méndez, M. y Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23, 1175–1188.
- Mitchell, T. D. y Jones, P. D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, 693–712.
- Molotch, N. P., Brooks, P. D., Burns, S. P., Litvak, M., Monson, R. K., McConnell, J. R. et al. (2009). Ecohydrological controls on snowmelt partitioning in mixed-conifer subalpine forests. *Ecohydrology*, 2, 129–142.
- Mosteller, F. y Tukey, J. W. (1977). *Data analysis and regression*. Reading, EUA: Addison-Wesley.
- NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica). (2006). National Geophysical Data Center. ITRDB. International Tree-Ring Data Bank. Boulder, Colorado. Disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring>
- Pallardy, S. G. y Kozłowski, T. T. (2008). *Physiology of woody plants*. Boston: Elsevier.

- Park-Williams, A., Allen, C. D., Macalady, A. K., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M. et al. (2012). Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 3, 292–297.
- Pataki, D. E., Oren, R. y Smith, W. K. (2000). Sap flux of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought. *Ecology*, 81, 2557–2566.
- Pavia, E. G., Graef, F. y Reyes, J. (2006). PDO–ENSO Effects in the Climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19, 6433–6438.
- Pompa-García, M., Cerano-Paredes, J. y Fule, P. Z. (2013). Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia*, 31, 198–204.
- Ricker, M., Gutiérrez-García, G. y Daly, D. C. (2007). Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 977–989.
- Sánchez, O., Vega, E., Peters, E. y Monroy-Vilchis, O. (2003). *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Santillán-Hernández, M., Cornejo-Oviedo, E., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S. y Capó-Arteaga, M. Á. (2010). Potencial dendroclimático de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques*, 16, 17–30.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J. et al. (2009). Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera*, 22, 1–31.
- Seiler, K. P. y Gat, J. (2007). *Groundwater recharge from runoff, infiltration and percolation*. Dordrecht: Springer.
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. Tucson: University of Arizona Press.
- SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto). (1981). *Síntesis geográfica de Nuevo León*. México D.F.: Secretaría de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática.
- St. George, S., Meko, D. M. y Cook, E. R. (2010). The seasonality of precipitation signals embedded within the North American Drought Atlas. *The Holocene*, 20, 983–988.
- Stokes, M. A. y Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. Tucson: University of Arizona Press.
- Tang, K. y Feng, X. (2001). The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water. *Earth and Planetary Science Letters*, 185, 355–367.
- Thuiller, W., Albert, C., Araújo, M. B., Berry, P. M., Cabeza, M., Guisan, A. et al. (2008). Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 9, 137–152.
- Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771–2777.
- Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R. et al. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4, 17–22.
- Treviño, G. E. (1984). *Contribución al conocimiento de la vegetación del municipio de General Zaragoza, Nuevo León, México*. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolas de los Garza, Nuevo León, México.
- Verdon, D. C. y Franks, S. W. (2006). Long-term behaviour of ENSO: interactions with the PDO over the past 400 years inferred from paleoclimate records. *Geophysical Research Letters*, 33, L06712.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Olivares-Bañuelos, N. C., Valles-Pérez, M., Stahle, D. W. y Cervantes-Martínez, R. (2015). Respuesta climática del ciprés (*Hesperocyparis guadalupensis*) en Isla Guadalupe, Baja California, México. *Madera y Bosques*, 21, 149–160.
- Villanueva-Díaz, J., Fule, P. Z., Cerano-Paredes, J., Estrada-Ávalos, J. y Sánchez-Cohen, 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 Mexico*, 34, 39–71.
- Villanueva-Díaz, J., Luckman, B. H., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., Cerano-Paredes, J. et al. (2005). Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, Mexico. *Dendrochronologia*, 22, 215–223.
- Villanueva-Díaz, J., Paredes, J. C., García, V. C., Fule, P. Z. y Cornejo-Oviedo, E. (2009). Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques*, 15, 45–64.
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K. et al. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83, 117–131.
- West, G. H. (2011). *Defining the regional and seasonal climatic response of long Douglas-fir tree-ring chronologies in central Mexico (Tesis de maestría)*. Universidad de Arkansas. Fayetteville, EUA.
- Whitmore, F. y Zahner, R. (1967). Evidence for a direct effect of water stress on tracheid cell wall metabolism in pine. *Forest Science*, 13, 397–400.