



Artículo / Article

Modelos dendroclimáticos para crecimiento radial forestal

Dendroclimatic models for tree radial growth

Felipa de Jesús Rodríguez Flores¹, Marín Pompa-García²,
Carlos Mallén Rivera³ y Rodolfo Goche Télles²

Resumen

La dendrocronología es una herramienta útil para analizar las relaciones entre el clima y los árboles. Sin embargo, existen pocos estudios en México que hayan examinado detalles de cómo la sensibilidad del crecimiento radial de *Pinus cooperi* puede variar de acuerdo al clima local. Es esencial entender las implicaciones de cada variable climática para el estudio futuro de los diferentes procesos ecológicos que las especies pueden experimentar: extinción, migración o ajustes fisiológicos. Los índices del ancho de anillos de crecimiento han sido documentados como indicadores útiles para entender mejor la respuesta de crecimiento de los árboles a las variables de clima regional. En este estudio se elaboraron modelos de respuesta climática mediante tres series dendrocronológicas (TRI): Standard (Sd), Residual (Rd) y Arstan (Ar). Se trabajó en un área del estado de Durango en la Sierra Madre Occidental. A partir de procedimientos de regresión múltiple se asociaron las primeras series con datos históricos de precipitación y temperatura. Los análisis de regresión revelaron diferencias en sensibilidad de TRI a variables climáticas. En particular, las respuestas más fuertes de TRI al clima mensual se observaron para temperaturas máximas y mínimas.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, crecimiento radial, dendrocronología, índices dendrocronológicos, *Pinus cooperi* Blanco, relaciones clima-crecimiento de árbol.

Abstract

Dendrochronology is a useful tool for analyzing the relationships between climate and trees. However, there are few studies in Mexico that have examined details of how the sensibility of radial growth in *Pinus cooperi* can vary according to the local climate. Understanding the implications of each climatic variable is essential for the future study of the different ecological processes that the species may experience: extinction, migration or physiological adjustments. Tree ring width indexes have been documented as a useful signal to better understand tree growth response to regional climate variables. In this study models of tree ring growth response to the weather were made by using three representations of one dendrochronological series (TRI): Standard (Sd), Residual (Rd) and Arstan (Ar). The study area is located in the *Sierra Madre Occidental* in the state of *Durango*, Mexico. From multiple regression procedures, the first series with historical data of precipitation and temperature were associated. Regression analyses revealed sensibility differences of TRI to climatic variables. In particular, the strongest responses of TRI to monthly weather were observed for maximum and minimum temperatures.

Key words: Tree-rings, radial growth, dendrochronology, dendrochronological indexes, *Pinus cooperi* Blanco, tree-growth-climate relations.

Fecha de recepción/date of receipt: 21 de noviembre de 2013; Fecha de aceptación/date of acceptance: 28 de agosto de 2014.

¹ Universidad Politécnica de Durango.

² Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Correo-e: mpgarcia@ujed.mx

³ CENID COMEF INIFAP

Introducción

La dendrocronología es una herramienta útil para analizar las relaciones entre el clima y los árboles (Fritts, 2001). Los índices del ancho de los anillos de crecimiento se han documentado como un indicador útil para entender mejor la respuesta del crecimiento de los árboles a las variables climáticas regionales (Bickford *et al.*, 2011). El proceso de estandarización elimina el efecto de la edad y la geometría del árbol, e incrementa la calidad del registro climático (Cook, 1987). Así, se generan tres índices dendrocronológicos: el Standard (Sd), el Residual (Rd) y el Arstan (Ar) (Cook y Holmes, 1984).

A pesar de la larga historia de la dendrocronología (Briffa *et al.*, 1998), poco se sabe de cómo la sensibilidad del crecimiento radial de *Pinus cooperi* Blanco puede modificarse con diferentes índices de anillo de crecimiento (TRI) y algunas variables climáticas. Entender las implicaciones de cada una de ellas es esencial para el estudio futuro de los diferentes procesos ecológicos que las especies pueden experimentar: extinción, migración y ajustes fisiológicos (Viveros *et al.*, 2009). El objetivo de este estudio fue construir modelos de la respuesta al clima del crecimiento radial de los árboles usando tres representaciones de series dendrocronológicas de *Pinus cooperi*. Los TRI se asociaron con datos históricos de precipitación y temperatura. Se parte de la hipótesis de que uno o más de los TRI probados respondieron a los patrones de precipitación o temperatura.

Materiales y Métodos

El área de estudio se localiza en la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, México, entre las coordenadas extremas 24°8'30" N, 105°3'25" O y 24°4'40" N, 105°1'15" O (Figura 1).

Se seleccionaron al azar diez árboles dominantes de *Pinus cooperi* en cada rodal, se muestrearon y se usaron para análisis ulteriores. El diámetro medio de los árboles medido a 1.30 m fue de 47.1 cm. Cuando menos se extrajeron dos virutas de cada uno a los 1.3 m mediante un taladro de Pressler (Haglöf, Sweden). Los árboles estaban creciendo bajo condiciones ambientales difíciles a partir de suelos delgados y pedregosos, pendientes moderadas (5-10 %) y exposiciones sur-este. Se evitó utilizar a los ejemplares dañados, declinantes, muertos o deformados así como aquellos cuyo crecimiento haya estado influido por competencia con los vecinos. En esta región predomina el clima templado subhúmedo con una temporada húmeda y un verano fresco debido a la repercusión del monzón, así como una época seca característica (Pompa, 2013).



Introduction

Dendrochronology is a useful tool for analyzing the relationships between climate and trees (Fritts, 2001). Tree ring width indexes have been documented as an useful signal to better understand tree growth response to regional climate variables (Bickford *et al.*, 2011). The standardization process eliminates the effect of the age and geometry of the tree, increasing the quality of the climate signal (Cook, 1987). Thus, three dendrochronological indexes are generated: Standard (Sd), Residual (Rd) and Arstan (Ar) (Cook and Holmes, 1984).

Despite the long history of dendrochronology (Briffa *et al.*, 1998), little is known about how the sensitivity of radial growth of *Pinus cooperi* Blanco may vary with several weather variables and different tree ring indexes (TRI). Understanding the implications of each climatic variable is essential for the future study of the different ecological processes that the species may experience: extinction, migration or physiological adjustments (Viveros *et al.*, 2009). The aim of this study was to build models of tree radial growth response to the weather using three representations of one dendrochronological series of *Pinus cooperi*. TRI were associated with historical data of precipitation and temperature. It is hypothesized that one or more of the TRI tested responded to precipitation or temperature patterns.

Materials and Methods

The study area is located in the *Sierra Madre Occidental* in the state of *Durango, Mexico*, between the extreme coordinates 24°8'30" N, 105°3'25" W, and 24°4'40" N, 105°1'15" W (Figure 1).

Ten dominant trees of *Pinus cooperi* were randomly selected in each stand, sampled and used in further analyses. The mean diameter of trees measured at 1.3 m was 47.1 cm. At least two increment cores were extracted from each one of them at 1.3 m height tree using a Pressler (Haglöf, Sweden) increment borer. Trees were growing under harsh environmental conditions given by thin and rocky soils, moderate slopes (5-10 %) and south-eastern exposure. Injured, declining, dead or deformed trees, were avoided as well as those whose growth may have been influenced by competition with neighbors. This region experiences a temperate sub-humid climate with wet and cool summer period due to the monsoon effect, and also characteristic dry seasons (Pompa, 2013).

Cores were air dried, mounted and sanded before being visually cross-dated using the procedures described by Stokes and Smiley (1968). Then, they were measured to 0.001 mm precision by using a Velmex measuring sledge. The quality of the dating was statistically checked using the computer program COFECHA (Holmes, 1983). Thus, three ring indexes or chronologies were generated: (Sd), in which the ring width

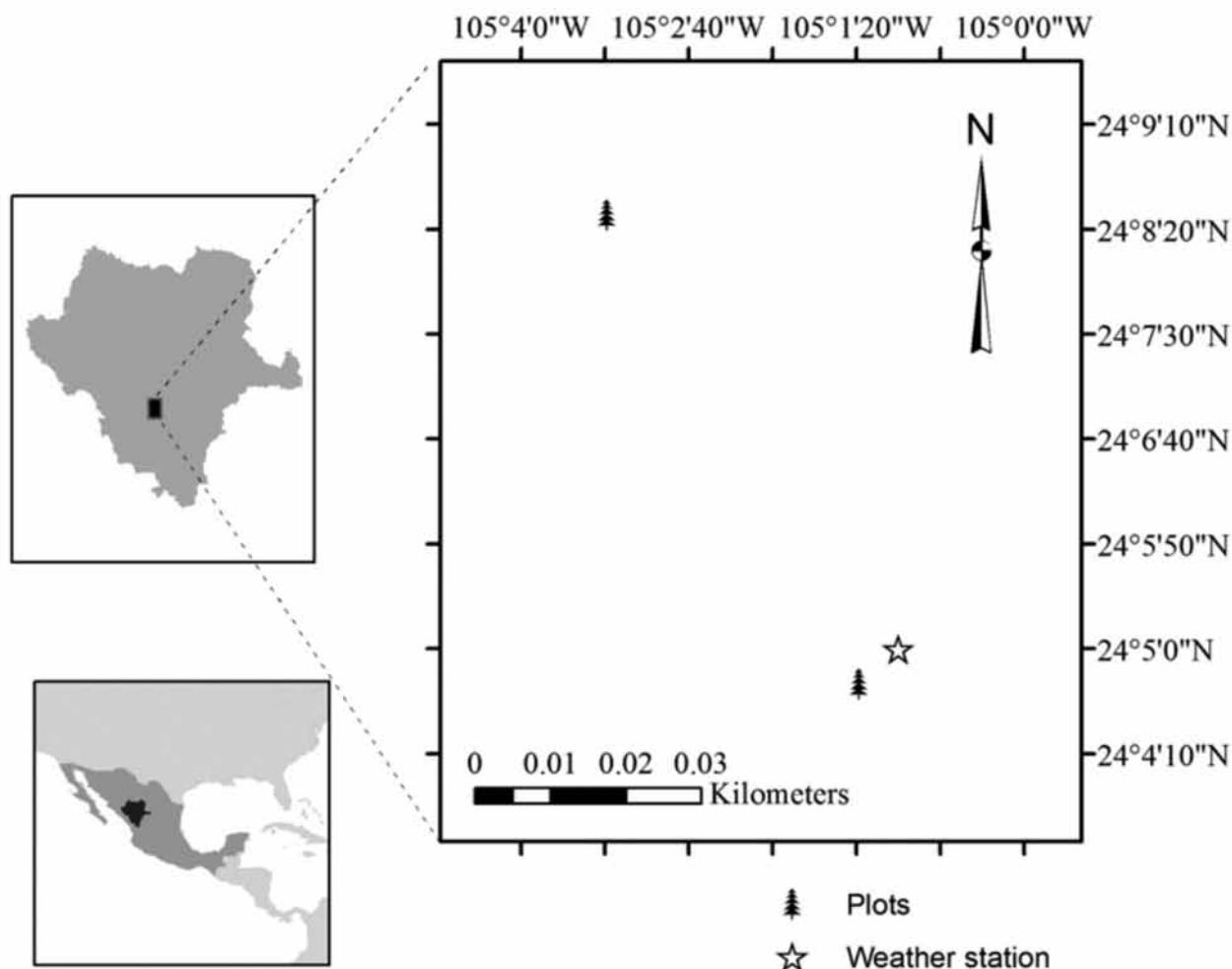


Figura 1. Mapa de la ubicación de los rodales de *Pinus cooperi* Blanco muestreados y la estación climatológica usada para asociar las variables correspondientes.

Figure 1. Map showing the location of sampled *Pinus cooperi* Blanco stands and the weather station used to associate climatic conditions.

Las virutas fueron secadas al aire, montadas y lijadas antes de ser fechadas visualmente, mediante los procedimientos recomendados por Stokes and Smiley (1968). Posteriormente se les midió con un calibrador Velmex de 0.001 mm de precisión. La calidad del fechado se rectificó estadísticamente mediante el programa COFECHA (Holmes, 1983). Así, se generaron tres índices de anillos de crecimiento o cronologías: (Sd), en el cual los índices de grosor del anillo de cada serie que comprende la muestra son estadísticamente promediados; (Rd), derivado del residual del modelo de autoregresión (i.e. se elimina la autocorrelación entre los anillos); y (Ar), en el que los coeficientes del modelo de regresión son incorporados a los valores residuales previamente obtenidos por el modelo de autoregresión.

indexes of each series comprising the sample are averaged statistically; (Rd), derived from the residual of the autoregression model (i.e. eliminating the autocorrelation between rings); and (Ar), in which the regression model coefficients are incorporated to the residual values previously obtained with the autoregression model.

The statistical quality of the chronology was assessed at CENID RASPA Dendrochronology Lab by means of the following parameters calculated in the 1962-2010 common interval: mean intercorrelation, mean sensitivity, autoregressive model order 1 and expressed population signal (EPS). The chronology segment with $EPS > 0.85$ was defined as statistically reliable (Merian *et al.*, 2013).



La calidad estadística de la cronología se evaluó en el Laboratorio de Dendrocronología del CENID RASPA por medio de los siguientes parámetros calculados en el intervalo común 1962-2010: intercorrelación media, sensibilidad media, modelo autoregresivo orden 1 y señal poblacional expresada (EPS, por sus siglas en inglés). El segmento cronológico con $EPS > 0.85$ fue definido como estadísticamente confiable (Merian *et al.*, 2013).

Los datos de clima de 1962- 2010 fueron usados para correlacionar las series dendrocronológicas con las variables de este orden y provienen de la estación Otinapa (CNA, 2012), a partir de su proximidad con los sitios de muestreo. Las variables climáticas que se consideraron fueron: la precipitación mensual total (PP) en milímetros y las temperaturas mensuales mínimas y máximas (Tmax and Tmin) en °C.

Para el periodo 1962-2010, todas las cronologías de anillos se asociaron con PP, Tmax y Tmin mediante el software SAS/STAT (SAS, 2004), mismo que se usó, así mismo, para hacer el cómputo de las funciones de respuesta del crecimiento de los árboles al clima por medio de una regresión múltiple. Una regresión por pasos fue llevada a cabo con un nivel de significancia de 0.01 para aquellas variables significativamente correlacionados con TRI.

Resultados y Discusión

Los estadísticos dendrocronológicos se sintetizan en el Cuadro 1. Confirman que la cronología del grosor de los anillos estuvo bien replicada y que los árboles presentaron patrones comunes de crecimiento y una variabilidad alta cada año, probablemente en respuesta al clima.

Cuadro 1. Estadísticos dendrocronológicos de la cronología de *Pinus cooperi* Blanco.

Número de series fechadas	Intercorrelación media	Sensibilidad media	Modelo autoregresivo de orden 1	EPS
15	0.612	0.45	0.67	0.86

Table 1. Dendrochronological statistics of the *Pinus cooperi* Blanco chronology.

Number of dated series	Mean intercorrelation	Mean sensitivity	Autoregressive model order 1	EPS
15	0.612	0.45	0.67	0.86

El análisis de regresión de los índices con PP, Tmax y Tmin mostró una asociación significativa para el área de estudio. El Cuadro 2 reúne variables específicas a diferentes variables climáticas. Las variables seleccionadas PP para los modelos, fueron, en esencia, las del año anterior. SEP y DEC se asociaron preferentemente con TRI ($Pr F < 0.0001$, $R^2 = 0.2734$) para Sd. Los modelos en Tmax explicaron 30 %, 41 % y 52 % del total de la varianza de Sd, Rs y Ar (respectivamente), mientras que Tmin manifestó tendencias

Climate data from 1962 to 2010 were used to correlate the dendrochronological series with climate variables and they came from Otinapa station (CNA, 2012), given its proximity to the sampling sites. The climate variables that were taken into account were: total monthly precipitation (PP) in mm and the monthly minimum and maximum temperatures (Tmax and Tmin) in °C.

For the 1962-2010 period, all ring chronologies were associated with PP, Tmax and Tmin by using the SAS/STAT statistical software (SAS, 2004), which was used, as well, to compute the response functions of tree growth to climate by means of a multiple regression. A stepwise regression was then carried out with a level of significance of 0.01 for those climatic variables significantly correlated with TRI.

Results and Discussion

The dendrochronological statistics are summarized in Table 1. They evidenced that the tree-ring width chronology was well replicated and trees presented common growth patterns and a high year-to-year variability, probably in response to climate.

The regression analysis of the indices with PP, Tmax and Tmin showed a significant association for the study area. Table 2 shows specific variables to different weather variables. PP variables selected for the models were mainly those from the previous year. SEP and DEC were mainly associated with TRI ($Pr F < 0.0001$, $R^2 = 0.2734$) for Sd. Models at Tmax explained 30 %, 41 % and 52 % of the total variance of Sd, Rs and Ar (respectively), whereas Tmin showed inverse trends for TRI (47 %, 20 %, and 16 %, respectively). Also the smaller mean square errors values might have occurred due to lack of monthly variables.

Linear regression results indicated that Sd was consistent for most climate variables, except for Tmax where Ar did. The relationship between TRI and the climatic variables did not have similar monthly variables, even though the Sd models were not different from the Ar models. The strongest responses of TRI to monthly weather, in particular, were observed for temperatures (Tmax, Tmin) rather than PP. The model for Tmax explained higher R^2 (52 %), indicating the best predictive capability.

contrarias para TRI (47 %, 20 % y 16 %, respectivamente). También se presentaron valores más bajos de los errores cuadráticos medios debido a la ausencia de variables mensuales.

Los resultados de la regresión lineal indicaron que Sd fue consistente para casi todas las variables climáticas, excepto para Tmax, donde Ar sí lo fue. La relación entre TRI y las variables climáticas no tuvo variables mensuales similares aun cuando los modelos Sd no fueron diferentes a los modelos Ar. Las respuestas más vigorosas de TRI al clima mensual, en particular, fueron observadas para temperaturas (Tmax, Tmin) más que para PP. El modelo para Tmax explicó un R² (52 %) más alto, lo que indica una capacidad predictiva mejor.

The values of dendrochronological statistics reflecting common growth coherency among and within trees and high year-to-year variability in growth were similar to those reported for chronologies of other conifers growing in northern Mexico (Bickford *et al.*, 2011; Cerano *et al.*, 2012).

Northern Mexican *P. cooperi* tree-rings responded to water availability and temperatures. Tree-ring width chronologies of this species represent a valuable and robust proxy of precipitation and temperatures in the *Sierra Madre Occidental*, where water, biodiversity and forest resources provide valuable ecosystem services to local populations.

Cuadro 2. Modelos para TRI seleccionados por la regresión por pasos para diferentes variables climáticas, a un nivel de significancia de 0.01.

PP						
Índice	Variable*	Estimador del Parámetro	Error Standard	Error del Cuadrado Medio	R ²	Pr >F
Sd	Intercept	0.60242	0.11901	0.14376	0.2734	<.0001
	SEP	0.00537	0.00170			0.0028
	DEC	0.00203	0.00073096			0.0079
Rs	Intercept	1.01565	0.05400	0.13999	0.1262	<.0001
Ar	Intercept	0.84412	0.08664	0.18435	0.1534	<.0001
	DEC	0.00554	0.00192			0.0059
Tmax						
Sd	Intercept	5.96018	5.26535	3.23337	0.3087	0.2698
	Apr	0.64674	0.2063			0.0048
Rs	Intercept	8.44638	3.86998	3.01034	0.4188	0.0400
	Jan	0.55125	0.13844			0.0006
Ar	Intercept	2.47580	4.72451			0.6055
	JAN	0.83767	0.17105			<.0001
Tmin						
Sd	Intercept	-3.72818	1.75317	3.02052	0.4736	0.0449
	AUG	0.62310	0.18945			0.0033
Rs	Intercept	-8.70417	0.35363	3.00129	0.2036	<.0001
Ar	Intercept	-6.50417	0.32334	2.50911	0.1643	<.0001

* Las mayúsculas denotan año de crecimiento mensual previo, mientras que las minúsculas el año de crecimiento corriente.

R² = Coeficiente de determinación.



Table 2. Models for TRI selected by stepwise regression for different climate variables, at the 0.01 significance level.

PP						
Index	Variable*	Parameter Estimate	Standard Error	Mean Square Error	R ²	Pr >F
Sd	Intercept	0.60242	0.11901	0.14376	0.2734	<.0001
	SEP	0.00537	0.00170			0.0028
	DEC	0.00203	0.00073096			0.0079
Rs	Intercept	1.01565	0.05400	0.13999	0.1262	<.0001
Ar	Intercept	0.84412	0.08664	0.18435	0.1534	<.0001
	DEC	0.00554	0.00192			0.0059
Tmax						
Sd	Intercept	5.96018	5.26535	3.23337	0.3087	0.2698
	Apr	0.64674	0.2063			0.0048
Rs	Intercept	8.44638	3.86998	3.01034	0.4188	0.0400
	Jan	0.55125	0.13844			0.0006
Ar	Intercept	2.47580	4.72451			0.6055
	JAN	0.83767	0.17105			<.0001
Tmin						
Sd	Intercept	-3.72818	1.75317	3.02052	0.4736	0.0449
	AUG	0.62310	0.18945			0.0033
Rs	Intercept	-8.70417	0.35363	3.00129	0.2036	<.0001
Ar	Intercept	-6.50417	0.32334	2.50911	0.1643	<.0001

* Uppercase denotes previous month growth year, whilst lowercase denotes current growth year.

R² = Coefficient determination.

Los valores de los estadísticos dendrocronológicos que reflejan la coherencia común entre y dentro de los árboles y una variabilidad alta en el crecimiento año tras año fueron similares a los registrados para otras coníferas del norte de México (Bickford *et al.*, 2011; Cerano *et al.*, 2012).

Los anillos de crecimiento de *P. cooperi* de esta misma región del país respondieron a la disponibilidad de agua y a la temperatura. Las cronologías del grosor de los anillos de crecimiento de esta especie representan un proxy valioso y robusto de precipitación y temperaturas en la Sierra Madre Occidental, en donde el agua, la biodiversidad y los recursos forestales proporcionan servicios ecosistémicos importantes para las poblaciones locales.



Higher water availability during previous-fall to winter and current early-summer is associated to enhanced growth of *P. cooperi* in the study area. Such wet conditions correspond to low mean maximum temperatures and reduced evaporation rates, but also to high mean minimum temperatures and precipitation values (Hart *et al.*, 2010).

The Ar model exhibited a behavior temporarily similar to the Sd index, but showed an accentuated association with Tmax. For Grissino-Meyer *et al.* (1996) this series attempts to contain the strongest possible climate signals. Harley *et al.* (2011) reported that all dendrochronologies showed similarities in a dendroclimatic study of *Pinus elliottii* Englemann. However, they emphasized that the Ar index was comparatively better for explaining the influence of climate on the radial growth of the species.

Pinus cooperi seems to present a strategy in response to water deficit and rising evaporation rates by reducing growth probably due to previous stomatal closure and diminishing photosynthetic assimilation rates. High evaporations rates could

La mayor disponibilidad de agua durante el otoño previo al invierno y al verano temprano regular se asocia a un crecimiento reforzado de *P. cooperi* en el área de estudio. Dichas condiciones de humedad corresponden a temperaturas medias máximas bajas y a tasas de evaporación reducidas, pero también a temperaturas medias mínimas altas y a valores de precipitación iguales (Hart *et al.*, 2010).

El modelo Ar mostró un comportamiento temporal semejante al del índice Sd, pero con una marcada asociación al Tmax. Para Grissino-Meyer *et al.* (1996) esta serie intenta contener las señales climáticas más poderosas posible. Harley *et al.* (2011) registraron que todas las dendrocronologías manifestaron semejanzas en un estudio dendroclimático de *Pinus elliotii* Englemann. Sin embargo, enfatizaron que el índice Ar fue comparativamente mejor para explicar la influencia del clima en el crecimiento radial de la especie.

Pinus cooperi parece presentar una estrategia similar en su reacción al déficit de agua y en las crecientes tasas de evaporación al reducir el crecimiento, probablemente debido al cerramiento estomático previo y tasas decrecientes de asimilación fotosintética. Las altas tasas de evaporación también pudieran mejorar la respiración de los árboles y la evapotranspiración del rodal, lo que resultaría en un incremento en el déficit hídrico (Huang *et al.*, 2010). El stress por sequía puede reducir la asimilación de carbohidratos durante el otoño y el invierno, y se usa posteriormente para formar la madera temprana de la primavera siguiente (Camarero *et al.*, 2010). Esto pudiera explicar las contrastantes respuestas del crecimiento a la sequía en enero previo. Estas reacciones a escalas temporales más largas sugieren que son rezagadas al déficit acumulado de agua durante la temporada de crecimiento.

Conclusiones

Los resultados de este estudio indican que el crecimiento radial es muy sensible a las temperaturas, lo que sugiere que ligado al déficit hídrico, dirigen las respuestas del crecimiento de los árboles. En particular, las respuestas más fuertes de TRI al clima mensual se observaron para temperaturas máximas y mínimas (Tmax, Tmin). Esfuerzos adicionales deben aplicarse a la investigación dendrocronológica por proxies (viento, densidad, caracteres anatómicos, composición isotópica) como una fuente de información climática.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó dentro del marco de la Movilidad Académica auspiciada por la DICAF- UJED. Los autores agradecen el apoyo otorgado por the School of Forestry at Northern Arizona University, especialmente a Mark Sensibaugh y a Jim Allen. A Omar Durán y Julián Cerano del Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA de INIFAP, quienes contribuyeron con la toma de datos de campo y su procesamiento. Igualmente, su reconocimiento a los editores y revisores anónimos por sus útiles comentarios y sugerencias.

also enhance tree respiration and stand evapotranspiration, thereby resulting in increased water deficits (Huang *et al.*, 2010). Drought stress may reduce the assimilation of carbohydrates during fall and winter being later used for building the earlywood the following spring (Camarero *et al.*, 2010). This could explain the contrasting growth responses to drought in previous January. These growth responses to drought at longer time scales suggest lagged reactions to cumulative water deficit during the growing season.

Conclusions

The results of this study indicate radial growth is very sensitive to temperatures, which suggests that linked with water deficit, it is driving tree growth responses. In particular, the strongest responses of TRI to monthly weather were observed for temperatures (Tmax, Tmin). Additional effort should be put to search for dendrochronological proxies (wind, density, anatomical features, isotope composition) as a source of climatic information.

Acknowledgments

This work was conducted within the framework of Academic Mobility supported by the DICA- UJED. We thank the support given by the School of Forestry at Northern Arizona University, especially Mark Sensibaugh and Jim Allen. Omar Durán and Julián Cerano from CENID-RASPA Lab of INIFAP helped with field data gathering and processing. The authors are grateful to editors and anonymous reviewers for their useful comments and suggestions.

End of the English version



Referencias

- Bickford, I. N., Z. P. Fulé and T. E. Kolb. 2011. Growth sensitivity to drought of co-occurring *Pinus* spp. along an elevation gradient in northern Mexico. *Western North American Naturalist* 71(3):338-348.
- Briffa, K. R., F. H. Schweingruber, P. D. Jones, T. J. Osborn, C. Harris, S. G. Shiyatov, E. A. Vaganov, H. Grudd and J. Cowie. 1998. Trees tell of past climates: but are they speaking less clearly today? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 353: 65-73.
- Camarero, J., J. M. Olano and A. Parras. 2010. Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. *New Phytologist* 185: 471-480.
- Cerano, P., J. Villanueva D., R. D. Valdez C., V. Constante G., J. L. González B. y J. Estrada Á. 2012. Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(10): 7-23.
- Cook, E. R. and R. H. Holmes. 1984. ARSTAN program and users' manual. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. 15 p.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47:37-59.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2012. Datos climáticos de estaciones meteorológicas de Durango: Otínapa. <http://smn.cna.gob.mx/emas/> (8 de febrero de 2013).
- Fritts, H. C. 2001. *Tree rings and climate*. Blackburn Press. Caldwell, NJ, USA. 567 p.
- Grissino-Mayer, H. D., R. L. Holmes and H. C. Fritts. 1996. The international tree-ring data bank. Program library version 2.0 user's manual. Tucson, AZ, USA. 106 p.
- Harley, G. L., H. D. Grissino-Mayer and S. P. Horn. 2011. The dendrochronology of *Pinus elliotii* var. *densa* in the Lower Florida Keys: Chronology development and climate response. *Tree Ring Research* 67: 39-50.
- Hart, J. L., S. L. van de Gevel, J. Sakulich and H. D. Grissino-Mayer. 2010. Influence of climate and disturbance on the growth of *Tsuga canadensis* at its southern limit in eastern North America. *Trees* 24: 621-633.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Huang, J., J. C. Tardif, Y. Bergeron, B. Denneler, F. Berninger and M. P. Girardin. 2010. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology* 16: 711-731.
- Mérian, P., J. C. Pierrat and F. Lebourgeois. 2013. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* 31: 58-67.
- Pompa G., M. 2013. Sistema de información geográfica de los ecosistemas de Durango. Mapa de climas. <http://www.ujed.mx/sigeed/Inicio.aspx> (26 de agosto de 2014).
- Statistical Analysis System (SAS). 2004. SAS User's Guide Statistics. Release 9.1. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 2170 p.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press. Chicago, IL, USA. 73 p.
- Viveros V., H., C. Sáenz R., J. Vargas H., J. López U., G. Ramírez V. and A. Santacruz V. 2009. Altitudinal variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: height growth, shoot phenology and frost damage in seedlings. *Forest Ecology Management* 257: 836-842.

