

# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

**INCREMENTO EN ÁREA BASAL Y VARIACIÓN DE  
TRAQUEIDAS DE *Pinus hartwegii* LINDL. A  
DIFERENTE ALTITUD Y EXPOSICIÓN EN EL CERRO  
DE JOCOTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO**

**ANGÉLICA NÚÑEZ GARCÍA**

**T E S I S**  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

2019

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y  
DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el (la) que suscribe ANGÉLICA NÚÑEZ GARCÍA Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRRERO, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

**Incremento en área basal y variación de traqueidas de Pinus hartwegii Lindl. a diferente altitud y exposición en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México.**

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 22 de        Enero    de 2019       



Firma del Alumno (a)



DR ARMANDO GÓMEZ GUERRERO


Vo. Bo. Del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **"Incremento en área basal y variación de traqueidas de *Pinus Hartwegii* Lind. a diferente altitud y exposición en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México"**, realizada por la alumna: **ANGÉLICA NÚÑEZ GARCÍA** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



---

DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO


ASESORA



---

DRA. TERESA TERRAZAS SALGADO

ASESOR



---

DR. J. JESÚS VARGAS HERNÁNDEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2019

Incremento en área basal y variación de traqueidas de *Pinus hartwegii* Lindl. a diferente altitud y exposición en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México

Angélica Núñez García, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2019

## RESUMEN

El crecimiento de especies forestales depende de las condiciones ambientales y topográficas del sitio, lo que influye en la anchura de anillo, crecimiento en área, así como en rasgos estructurales de la madera que definen las propiedades funcionales del xilema. Los objetivos de la investigación fueron: generar una cronología preliminar de índice de ancho de anillo (IAA), medir el incremento en área basal (IAB) en árboles de *Pinus hartwegii* a diferentes altitudes y exposiciones y relacionar ambos con variables climáticas de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, así como analizar el número y diámetro de traqueidas en madera temprana y tardía en anillos de crecimiento en la última década. Se establecieron cuatro sitios de muestreo en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México; a una altitud de 3700 y 3800 y exposiciones noroeste y suroeste. Por sitio, se colectaron 32 segmentos de crecimiento con un taladro de Pressler de 6 mm. Se midió anchura de anillo con el software Windendro®. Se realizaron correlaciones entre índice de ancho de anillo (IAA), incremento en área basal (IAB) con variables climáticas (temperatura y precipitación). Para estimar número de traqueidas en madera temprana, tardía y total se emplearon imágenes fotográficas de anillos de crecimiento. La estimación del diámetro promedio de traqueidas se determinó dividiendo el ancho de madera

tardía y madera temprana entre el número de traqueidas. Como resultado se generó una serie de índices de anchura de anillo con una correlación de 0.33. Periodos de bajo crecimiento fueron entre 1950 y 1960, y entre 1990 y 2005; y de mayor crecimiento fueron de 1965 a 1985 y de 2012 a 2016. La temperatura del mes de octubre del año previo y el periodo de precipitación de abril a septiembre del año actual explicaron significativamente ( $P < 0.05$ ) el índice de anchura de anillo e incremento en área basal. El sitio SO-3700 mostró un segundo periodo de aumento constante del incremento en área basal a partir de 1978 y presentó mayor número de traqueidas en madera temprana, tardía y en todo el anillo. La interacción Altitud x Exposición fue estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ) para explicar la variación de número y diámetro de traqueidas. El sitio SO-3700 fue más sensible a la variación climática reciente. La ubicación topográfica del sitio influye en la temperatura y a su vez en la actividad de cambium y número y diámetro de traqueidas.

**Palabras clave:** *bosque alpino, dendrocronología, madera temprana, madera tardía, traqueidas.*

Basal area increment and variation of tracheids of *Pinus hartwegii* Lindl. under different altitude and aspect in the Jocotitlan mountain, State of México.

Angélica Núñez García, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2019

### **ABSTRACT**

Tree growth of forest species is defined by the environmental and topographic conditions of site, which in turn influence tree-ring width and basal area increment and wood structural features, thus defining functional properties of xylem. This work aimed to build a tree-ring ring index chronology (IAA), and develop basal increment series (IAB) of *Pinus hartwegii* trees growing under different altitudes and aspect, and relate them to climatic variables from near meteorological stations. A second objective was to analyze the number and diameter of tracheids in earlywood and latewood in last decade. Four sampling sites were established in the Jocotitlan mountain, State of Mexico; with two altitudes. 3700 and 3800 masl and two aspects, northwest (NO) and southwest (SO). A total of 32 growth segments per site were collected with a Pressler woodcore sampler 6mm in diameter. Tree-ring width measurements were obtained with the WinDENDRO® software. Tree variables, IAA and IAB, were correlated to climatic variables (temperatura and precipitation). The number of tracheids in earlywood and latewood was determined from photographic images. The diameter of tracheids was estimated by dividing early and late wood width by the number of tracheids. Tree-ring segments had a correlation of 0.33. The relevant low-growth periods were of 1950 to 1960 and 1990 to 2005 and the relevant high-growth periods were 1965 to 1985 and 2012 to 2016. October montly temperature of the previous year

and the precipitation of the April-September period significantly ( $P < 0.05$ ) explained the tree-ring index and basal area increment. The SO-3700 site showed a second period of constant increase in basal area increment and had higher number of tracheids in earlywood and latewood rings. The interaction altitude  $\times$  aspect was statistically significant ( $P < 0.05$ ) to explain the variation of number and diameter of tracheids. The SO-3700 site, was more sensitive to the recent climate variation. The topographical location of the site influences temperature and cambium activity and the number and diameter of tracheids.

**Key words:** *alpine forest, dendrochronology, earlywood, latewood, tracheids.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados y al Postgrado Forestal por haberme dado la oportunidad de estudiar en esta institución y contribuir a mi formación académica.

Al Dr. Armando Gómez-Guerrero por su admirable labor como consejero, como persona, como profesor y por su dedicación y apoyo brindado para culminar esta investigación.

Al Dr. J. Jesús Vargas-Hernández por ser parte de mi consejo particular, por el conocimiento compartido y por las aportaciones a este trabajo.

A la Dra. Teresa Terrazas por ser parte de mi consejo particular y por la disposición que mostró siempre para aportar al trabajo.

A mi compañera de trabajo de campo Fabiola Torres Duque, que hizo que el trabajo de campo fuera más ameno y a Diana Córdoba por su acompañamiento durante la etapa de muestreo.

Al ayuntamiento del municipio de Jocotitlán por otorgar las facilidades para realizar esta investigación.



## DEDICATORIAS

A mis padres Gabriel Núñez Cruz y Virginia García Hermenegildo por su infinito apoyo y consejos para lograr mis estudios.

A mis hermanas Alejandra Núñez García y Virginia Núñez García por sus consejos y acompañamiento

A Maycon Mendoza por su apoyo incondicional y la motivación para realizar mi postgrado.

A Atziri Mendoza Núñez, por iluminar mi camino y convertirse en mi motivación.

A Leonardo Gabriel por su cariño y alegría brindada.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	viii
DEDICATORIAS .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE CUADROS .....	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
LITERATURA CITADA.....	5
CAPÍTULO I. INCREMENTO EN ÁREA BASAL DE <i>Pinus hartwegii</i> LIND. A DIFERENTE ALTITUD Y EXPOSICIÓN EN EL CERRO DE JOCOTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO. ....	9
1.1    Resumen.....	9
1.2    Introducción.....	10
1.3    Materiales y métodos .....	12
1.3.1    Área de estudio.....	12
1.3.2    Selección de sitios de estudio .....	13
1.3.3    Colecta de núcleos de madera .....	13
1.3.4    Índice de anchura de anillo (IAA).....	15
1.3.5    Incremento en área basal .....	15
1.3.6    Información climática .....	15
1.3.7    Correlación entre el IAA y variables climáticas .....	16
1.3.8    Correlación entre IAB y variables climáticas.....	17
1.4    Resultados .....	17
1.4.1    Parámetros de los árboles muestra .....	17
1.4.2    Serie de IAA.....	18
1.4.3    Incremento en área basal (IAB) .....	18
1.4.4    IAB y edad cambial .....	19
1.4.5    Correlación entre IAA y variables climáticas.....	20
1.4.6    Correlación entre IAB y variables climáticas.....	20
1.5    Discusión.....	21

1.5.1 Series de IAA y IAB .....	21
1.5.2 Edad cambial .....	25
1.5.3 Relación del IAA y IAB con variables climáticas .....	25
1.6 Conclusiones.....	26
Literatura citada .....	27
<b>CAPÍTULO II. VARIACIÓN EN NÚMERO Y DIÁMETRO DE TRAQUEIDAS DE</b> <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. EN DIFERENTES ALTITUDES Y EXPOSICIONES.....	33
2.1 Resumen.....	33
2.2 Introducción.....	34
2.3 Materiales y métodos .....	36
2.3.1 Área de estudio.....	36
2.3.2 Selección de sitios de estudio.....	37
2.3.3 Colecta de núcleos de madera .....	37
2.3.4 Preparación de las muestras .....	39
2.3.5 Medición del ancho de anillo, madera temprana y madera tardía .....	39
2.3.6 Recuento de traqueidas.....	39
2.3.7 Estimación de diámetro promedio de traqueidas.....	40
2.4 Análisis estadístico.....	40
2.5 Resultados .....	40
2.5.1 Número medio de traqueidas.....	40
2.5.2 Diámetro de traqueidas.....	42
2.5.3 Número y diámetro de traqueidas en el tiempo .....	43
2.6 Discusión.....	43
2.6.1 Variación en el número de traqueidas .....	43
2.6.2 Variación en diámetro de traqueidas .....	46
2.6.3 Variación en número y diámetro de traqueidas en el tiempo.....	47
2.7 Conclusiones.....	48
Literatura citada.....	49
<b>CONCLUSIÓN GENERAL .....</b>	<b>51</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cronología de IAA de <i>Pinus hartwegii</i> generada para la región del Cerro Jocotitlán, Estado de México .....	18
Figura 2. Evolución de incremento en área basal de <i>Pinus hartwegii</i> para los cuatro sitios de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México. Prefijos NO=noroeste y SO=suroeste, números después del prefijo corresponden a la altitud.....	19
Figura 3. Variación del incremento en área basal (IAB) de <i>Pinus hartwegii</i> con respecto a la edad cambial por sitio de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México. Prefijos NO=noroeste y SO=suroeste, números después de prefijos corresponden a la altitud.....	20
Figura 4. Variación de la temperatura en los sitios de muestreo. Registros obtenidos del datalogger en cada sitio de muestreo. TMED= temperatura media; TMAX= temperatura máxima; TMIN= temperatura mínima.....	23
Figura 5. Número medio de traqueidas en anillos de crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i> sumados en la última década (2006-2016), para sitios con diferente altitud y exposición (sitios con una letra en común no son estadísticamente diferentes). MTEMP= madera temprana; MTARD= madera tardía.....	41
Figura 6. Diámetro medio de traqueidas en anillos de crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i> sumados en la última década (2006-2016), para sitios con diferente altitud y exposición (sitios con una letra en común no son estadísticamente diferentes). MTEMP= madera temprana; MTARD= madera tardía.....	42
Figura 7. Variación temporal del número (superior) y diámetro (inferior) de traqueidas en <i>Pinus hartwegii</i> durante la década de 2006 a 2016 MTEMP= madera temprana; MTARD= madera tardía; TTOT= traqueidas totales.....	43
Figura 8. Variación de la temperatura en los sitios de muestreo. Registros obtenidos del datalogger en cada sitio de muestreo. TMED= temperatura media; TMAX= temperatura máxima; TMIN= temperatura mínima.....	45

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución de los sitios de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México (NO=noroeste, SO= suroeste).....	13
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas alrededor del Cerro de Jocotitlán, Estado de México, empleadas para extraer datos de temperatura y precipitación.....	16
Cuadro 3. Características dasométricas promedio de árboles muestreados por sitio de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México.....	17
Cuadro 4. Correlación entre el índice de anchura de anillo (IAA) y variables climáticas bajo diferente altitud y exposición en el Cerro Jocotitlán. ....	21
Cuadro 5. Correlación entre el incremento en área basal (IAB) y variables climáticas bajo diferente altitud y exposición en el Cerro Jocotitlán. ....	21
Cuadro 6. Distribución de los sitios de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México (NO=noroeste, SO= suroeste).....	37
Cuadro 7. Muestras de árboles de <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. tomadas por sitio de muestreo para el recuento de traqueidas durante la última década de crecimiento (2006-2016). ....	38

## INTRODUCCIÓN GENERAL

Factores como densidad del rodal, edad del arbolado, calidad del sitio, altitud y exposición influyen en el incremento en área basal. Sin embargo, cuando se identifica una respuesta común en el crecimiento de los anillos anuales de los árboles (en adelante anillos) es posible comparar sitios con diferentes condiciones ambientales para entender la variación del crecimiento arbóreo en el paisaje (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Villanueva-Díaz *et al.*, 2009; Pompa-García *et al.*, 2013; Villanueva Díaz *et al.*, 2015c). Esta variación del crecimiento radial y en área basal queda registrada en la anchura de los anillos.

Así, la información sobre el incremento en área basal con relación a la altitud y exposición en bosques de alta montaña es útil para comprender la variación del crecimiento arbóreo en terrenos forestales (Körner, 2007). La evolución del crecimiento a partir de series de anillos permite deducir si el crecimiento arbóreo de las últimas décadas muestra posibles evidencias de la influencia del cambio climático.

*Pinus hartwegii* crece en montañas elevadas de México y Centroamérica, en altitudes que van 3,000 a 4,000 m (Musálem y Solís, 2000; Viveros-Viveros *et al.*, 2009); esta especie produce anillos anuales de crecimiento (Villanueva Díaz *et al.*, 2015b; Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017), aunque los cambios drásticos y estacionales de clima en un mismo año pueden dar lugar a la formación de anillos falsos en esta especie. Esta especie se vuelve importante ya que contribuye a la captura de carbono en las zonas altas, y con relevancia en la protección y

formación de suelo, la captación de agua y la generación de vista escénica, entre otros servicios ambientales.

El crecimiento radial de una serie de anillos se puede expresar en mediciones estandarizadas que se conocen como índices de anchura de anillo (IAA), con el cual se remueve parte de la variación no relacionada con el clima y es posible la comparación relativa entre el arbolado de diferentes edades.

El IAA y el incremento en área basal (IAB) pueden presentar correlación significativa, por lo que es posible considerar ambos índices como una medición del crecimiento arbóreo. El IAB es una variable bidimensional con unidades de  $\text{cm}^2 \text{ año}^{-1}$  que permiten una interpretación directa del crecimiento en los árboles (Poage y Tappeiner, 2002; Castruita-Esparza *et al.*, 2016).

Dado que la formación de la madera depende de las condiciones ambientales, la variación climática reciente puede influir en la organización de componentes de la madera de los árboles, ya que la humedad, temperatura y disponibilidad de nutrientes en el suelo afecta la división y expansión celular (Cuny & Rathgeber, 2016).

El proceso de formación de madera (xilogénesis) comprende eventos complejos que incluyen la división y expansión celular, así como la biosíntesis y depósito de compuestos en la pared celular secundaria (Plomion *et al.*, 2001).

De tal modo que el cambium vascular presenta patrones de producción y acumulación de elementos traqueales que componen la madera de acuerdo con las condiciones ambientales (Bernal-Salazar & Terrazas, 2000); siendo así los anillos de crecimiento, el resultado de la acumulación de tres procesos: división

cambial (número de células formadas), expansión celular (determinada por el diámetro del lumen) así como el grosor de la pared celular (Deslauriers *et al.*, 2008). La formación sincronizada de anillos con las estaciones del año son claves para los estudios dendroclimatológicos, ya que la evidencia de clima benigno queda registrada en anillos de mayor anchura y vice versa, dando lugar a la estructura anatómica de la madera (Martin-Benito, Beeckman, & Cañellas, 2013).

El número de células, estructura y composición; son importantes para definir propiedades funcionales en el xilema (Fonti & Babushkina, 2016), su estructura determina el riesgo potencial de colapso hidráulico durante periodos de sequía, ya que su estructura refleja el balance funcional entre la eficiencia para el transporte de agua y el crecimiento óptimo (Fonti & Jansen, 2012), asimismo, la disponibilidad de agua influye en el proceso de formación de la madera ya que es importante para la actividad metabólica celular y para mantener la turgencia celular (Cuny & Rathgeber, 2016; Fonti & Babushkina, 2016).

El entendimiento de la estructura y arreglo de los anillos de crecimiento en paisajes de montañas elevadas ayudará a explicar la respuesta de los árboles a la variación del clima (Cocozza *et al.*, 2016; Fonti & Babushkina, 2016).

Para comprender los posibles efectos del cambio climático sobre la formación de madera se debe investigar la respuesta de los árboles ante diferentes condiciones ambientales (Fonti & Babushkina, 2016), encontradas en diferente altitud y exposición.

Esta investigación se planteó como objetivos: (1) generar una cronología preliminar de IAA y relacionarla con variables climáticas de estaciones



meteorológicas cercanas al área de estudio, y (2) medir el incremento en área basal (IAB) en árboles de *Pinus hartwegii* a diferentes altitudes (3800 y 3700 m) y exposiciones (noroeste y suroeste) y relacionarlo con variables climáticas, (3) analizar el número y diámetro de traqueidas en madera temprana y tardía en anillos de crecimiento de árboles de *Pinus hartwegii* en diferente altitud (3800 y 3700 m) y exposición (noroeste y suroeste) en la última década de crecimiento. La hipótesis del estudio fue que el crecimiento de *P. hartwegii* varía con la altitud y exposición manteniendo una correlación estadísticamente significativa con las variables climáticas.

## LITERATURA CITADA

- Astudillo-Sánchez, C. C., J. Villanueva-Díaz, *et al.*. 2017. Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees* 31: 441-453. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1460-z>
- Bernal-Salazar, S., y T. Terrazas S. 2000). Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 6(1):73-86.
- Castruita-Esparza, L. U., A. Correa-Díaz, A. Gómez-Guerrero, *et al.* Ángeles-Pérez. 2016. Basal area increment series of dominant trees of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco show periodicity according to global climate patterns. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22: 379-397.  
[doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.10.048](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.10.048)
- Cocozza, C., Palombo, C., Tognetti, R., *et al.* 2016). Monitoring intra-annual dynamics of wood formation with microcores and dendrometers in *Picea abies* at two different altitudes. *Tree Physiology*, 36(7), 832-846.  
[doi:10.1093/treephys/tpw009](https://doi.org/10.1093/treephys/tpw009)
- Cuny, H., y Rathgeber. (2016). Xylogenesis: " Coniferous trees of temperate forests are listening to the climate tale during the growing season, but only remember the last words!". *Plant Physiology* 171: 306-317. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.16.00037>

- Deslauriers, A., S. Rossi, T. Anfondillo and A. Saracino. 2008. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiology* 28: 863-871.
- Fonti, P., & Babushkina, (2016). Tracheid anatomical responses to climate in a forest-steppe in Southern Siberia. *Dendrochronologia* 39: 32-41.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.09.002>
- Fonti, P., y Jansen. (2012). Xylem plasticity in response to climate. *New Phytologist* 195: 734-736.  
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04252.x>
- Körner, C. 2007. Climatic treelines: conventions, global patterns, causes (Klimatische Baumgrenzen: Konventionen, globale Muster, Ursachen). *Erdkunde*: 316-324.
- Martin-Benito, D., Beeckman, H., & Cañellas. (2013). Influence of drought on tree rings and tracheid features of *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a mesic Mediterranean forest. *European Journal of Forest Research* 132(1), 33-45.
- Musálem, M. y M. J. I. M. Solís. 2000. Monografía de *Pinus hartwegii*. SAGAR. INIFAP. CIRCE. Campo Experimental Valle de México. Libro Técnico No. 3. Chapingo, Estado de México. 96 p.
- Poage, N. J. y I. Tappeiner, John C. 2002. Long-term patterns of diameter and basal area growth of old-growth Douglas-fir trees in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1232-1243.  
<https://doi.org/10.1139/x02-045>

- Pompa-García, M., J. Cerano-Paredes y P. Z. Fulé. 2013. Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia* 31: 198-204.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.05.003>
- Plomion, C., G. Leprévost and A. Stokes. 2001. Wood formation in trees. *Plant Physiology* 127, 1513-1523.
- Villanueva, D., J., P. Z. Fulé, J. Cerano Paredes, *et al.* 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia forestal en México* 34: 37-69.
- Villanueva, D., J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, *et al.* 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83: 117-131.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>
- Villanueva, D., J., J. C. Paredes, P. Z. Fulé, *et al.* 2015c. Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 2015: 141-153.  
<http://dx.doi.org/10.14350/riq.44485>
- Villanueva, D., J., J. Cerano Paredes, L. Selem Vázquez, *et al.* 2015b. Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. 2015: 5-14.  
<https://doi.org/10.14350/riq.42003>

Viveros-Viveros, H., C. Saenz-Romero, J. J. Vargas-Hernández, *et al.* 2009.

Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257: 836-842.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>

# **CAPÍTULO I. INCREMENTO EN ÁREA BASAL DE *Pinus hartwegii* LIND. A DIFERENTE ALTITUD Y EXPOSICIÓN EN EL CERRO DE JOCOTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO.**

## 1.1 Resumen

Introducción: El crecimiento de especies forestales es determinado por factores bióticos y abióticos. La anchura de anillo y crecimiento en área basal varía de acuerdo con el clima y condiciones topográficas.

Objetivo: Medir el incremento en área basal de *Pinus hartwegii* Lindl. en dos altitudes y exposiciones, y explicar las variaciones con base en las condiciones del sitio.

Materiales y métodos: Se establecieron cuatro sitios de muestreo en el Cerro de Jocotitlán, Edo. de México a una altitud de 3800 y 3700, y exposiciones noroeste y suroeste. En cada sitio se colectaron 32 segmentos de crecimiento con un taladro de Preesler de 6mm. Se midió la anchura de anillo con el software Windendro® y se analizaron tendencias por sitio.

Resultados y Discusión. Se obtuvo una serie de índices de anchura de anillo con una correlación de 0.33. Los periodos de bajo crecimiento fueron entre 1950 y 1960, y entre 1990 y 2005; y, los periodos de mayor crecimiento fueron de 1965 a 1985 y de 2012 a 2016. El sitio SO-3700 mostró un segundo periodo de aumento constante del incremento en área basal a partir de 1978. En todos los sitios los árboles tuvieron su mayor incremento en área basal en la etapa juvenil entre 20 y 50 años, pero el sitio SO-3700 superó al resto de los sitios. La precipitación de abril a septiembre, temperatura de octubre del año previo, el promedio de

temperatura de septiembre-octubre del año previo y las temperaturas medias de febrero, marzo y febrero-marzo del año actual ( $P < 0.05$ ) explicaron el índice de anchura de anillo e incremento en área basal.

Conclusiones: El sitio SO-3700 fue más sensible a la variación climática reciente. Es importante considerar estas tendencias en modelos de crecimiento espacio-temporales.

Palabras clave: Bosque alpino, límite de crecimiento arbóreo, dendrocronología, cambio climático

## 1.2 Introducción

El crecimiento en área basal es indicador de los cambios en productividad de las especies forestales. Son varios los factores que influyen en el incremento en área basal, como la densidad del rodal, edad del arbolado, calidad del sitio, clima, altitud y exposición (Castruita *et al.*, 2016). Sin embargo, cuando se identifica una respuesta común en el crecimiento de los anillos anuales de los árboles (en adelante anillos) es posible comparar sitios con diferentes condiciones ambientales para entender la variación del crecimiento arbóreo en el paisaje (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Villanueva-Díaz *et al.*, 2009; Pompa-García *et al.*, 2013; Villanueva Díaz *et al.*, 2015c).

La variación del crecimiento radial y en área basal queda registrada en la anchura de los anillos, por lo que en las especies sensibles al clima se pueden encontrar patrones explicados por la variación en temperatura y precipitación (Deslauriers *et al.*, 2008; Castruita-Esparza *et al.*, 2016). La información sobre el incremento en área basal con relación a la altitud y exposición en bosques de alta montaña es útil para comprender la variación del crecimiento arbóreo en terrenos

forestales (Körner, 2007). La evolución del crecimiento a partir de series de anillos permite deducir si el crecimiento arbóreo de las últimas décadas muestra posibles evidencias de la influencia del cambio climático.

*Pinus hartwegii* produce anillos anuales de crecimiento (Villanueva Díaz *et al.*, 2015b; Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017), aunque los cambios drásticos y estacionales de clima en un mismo año pueden dar lugar a la formación de anillos falsos en esta especie. A pesar de ello, cuando se cumplen con indicadores dendrocronológicos en la calidad del fechado, es posible identificar una respuesta común en crecimiento y utilizar la información de *Pinus hartwegii* tanto para la construcción de series dendrocronológicas regionales como para la reconstrucción del clima e identificación de eventos extremos de clima (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017; Correa-Díaz *et al.*, 2019).

*Pinus hartwegii* crece en montañas elevadas de México y Centroamérica, en altitudes que van 3,000 a 4,000 m (Musálem y Solís, 2000; Viveros-Viveros *et al.*, 2009); marca el límite altitudinal de las especies arbóreas, por lo que es una especie importante que contribuye a la captura de carbono en las zonas altas, y con relevancia en la protección y formación de suelo, la captación de agua y la generación de vista escénica, entre otros servicios ambientales.

El crecimiento radial de una serie de anillos se puede expresar en mediciones estandarizadas que se conocen como índices de anchura de anillo (IAA). Cuantitativamente el IAA es una relación entre el crecimiento radial determinado por un modelo de crecimiento y su valor real observado, por lo que es un índice adimensional con media uno. Con el IAA se remueve parte de la variación no relacionada con el clima y es posible la comparación relativa entre



arbolado de diferentes edades. Los IAA se emplean para corroborar estadísticamente que los patrones de crecimiento arbóreo están correlacionados con el clima. El IAA y el incremento en área basal (IAB) pueden presentar correlación significativa, por lo que es posible considerar ambos índices como una medición del crecimiento arbóreo. La información de ambos índices es complementaria para estudiar las respuestas en crecimiento de un bosque. El IAB tiene la ventaja de ser una variable bidimensional con unidades de  $\text{cm}^2 \text{ año}^{-1}$  que permiten una interpretación directa del crecimiento en los árboles (Poage y Tappeiner, 2002; Castruita-Esparza *et al.*, 2016).

Este trabajo tuvo dos objetivos, (1) generar una cronología preliminar de IAA y relacionarla con variables climáticas de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, y (2) medir el incremento en área basal (IAB) en árboles de *Pinus hartwegii* a diferentes altitudes y exposiciones y relacionarlo con variables climáticas. La hipótesis del estudio fue que el crecimiento de *Pinus hartwegii* varía con la altitud y exposición manteniendo una correlación estadísticamente significativa con las variables climáticas.

### 1.3 Materiales y métodos

#### 1.3.1 Área de estudio

El cerro de Jocotitlán (Xocotépetl, nombre en mazahua), se ubica en el municipio con el mismo nombre, en el Estado de México, con coordenadas 19°36'45" latitud N y 99°39'33" longitud O. El clima predominante es templado subhúmedo (Cw) con lluvias en verano y temperatura media anual de 13.2 °C. La precipitación

media anual es de 1,008 mm, con heladas en noviembre y enero. Ocasionalmente, se presentan nevadas en las regiones altas (INAFED, 2010).

### 1.3.2 Selección de sitios de estudio

Para captar la variación en crecimiento con base a la posición topográfica del sitio, se consideraron dos niveles altitudinales, 3700 y 3800 m y dos exposiciones distribuidas en dos cuadrantes, Noroeste (NO) y Suroeste (SO). El Cuadro 1 muestra la distribución de los cuatro sitios de estudio. En cada sitio de observación se instaló un registrador electrónico (datalogger) para medir la temperatura y humedad relativa cada cuatro horas durante un año, a partir del 21 de abril del 2017.

Cuadro 1. Distribución de los sitios de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México (NO=noroeste, SO= suroeste).

Sitio	Altitud (m)	Latitud (°)	Longitud (°)
NO-3800	3,800	19°44'32"	99°45'52"
SO-3800	3,800	19°44'29"	99°45'58"
NO-3700	3,700	19.44'36"	99°45'39"
SO-3700	3,700	19°44'23"	99°46'05"

La posición altitudinal exacta de los sitios tiene una variación de  $\pm 15$ m.

### 1.3.3 Colecta de núcleos de madera

En cada sitio se seleccionaron 16 árboles sanos, dominantes o co-dominantes y con fuste recto. El criterio para seleccionar los árboles fue identificar cuatro árboles por cuadrante que cumplieran con ser individuos sin daño mecánico y de conformación de la sección transversal lo más cilíndrica posible, para que las estimaciones de área basal fueran lo más precisas posibles. La densidad arbórea

promedio, en el área de estudio es baja con 180 árboles por ha y  $14 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  de área basal.

En cada árbol se extrajeron dos núcleos de crecimiento a 1.3 m de altura sobre el suelo en sentido opuesto, utilizando un taladro de Pressler de 6 mm de diámetro. En total se colectaron 128 núcleos de crecimiento. El uso de dos o más segmentos por árbol permitió detectar con mayor facilidad la presencia de anillos falsos, ya que el fechado de un segmento de un árbol que llega a la médula sirve como guía para el segmento del lado opuesto (Bernal-Salazar y Terrazas-Salgado, 2000; Correa-Díaz *et al.*, 2014).

Los núcleos de crecimiento se envolvieron con papel periódico y se etiquetaron. Asimismo, a cada árbol muestra se le midió el diámetro normal con cinta diamétrica y la altura total con pistola Haga, con precisiones de 0.5 cm y 0.5 m, respectivamente.

#### Fechado y medición

Los núcleos de crecimiento se montaron en soportes de madera con pegamento blanco y una vez secas, se pulieron con lijas de diferente granulometría en una secuencia de 80 a 1000, hasta visualizar con claridad los anillos de crecimiento. Posteriormente se escanearon en un escáner marca EPSON a una resolución de 600 dpi. Sobre las imágenes escaneadas se realizaron mediciones de anchura de anillo con el software WinDENDRO® (Density 2016 Regent Instruments Inc.). Los anillos de crecimiento se cotejaron también de manera manual con un estereoscopio Nikon (SMZ800) identificando principalmente los años en común entre muestras.

#### 1.3.4 Índice de anchura de anillo (IAA)

Para estandarizar las series de crecimiento de cada árbol y eliminar tendencias biológicas (competencia, supresión y liberación) y geométricas (debido al incremento en diámetro con la edad) no relacionadas con el clima, se utilizó una curva suavizada (spline) con una frecuencia del 50% y una longitud de onda de 2/3 de la serie, dichos parámetros se establecieron usando la paquetería dplr en R (Cook, 1987; Bunn, 2008). Con el cociente entre los valores de anchura de anillo y los estimados por la función (spline) se generó una serie de índice de anchura de anillo con media 1.0 y varianza homogénea. Finalmente, para resaltar los periodos de baja frecuencia (eventos extremos) se utilizó otra curva suavizada (spline) con un parámetro de ajuste a cada 10 años (Cook and Peters, 1981).

#### 1.3.5 Incremento en área basal

El incremento en área basal (IAB) se determinó a partir de las mediciones directas de anchura de anillo con la siguiente ecuación:

$$IAB = \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2)$$

Donde IAB= incremento en área basal,  $R$ = radio del fuste en cm y  $n$  corresponde al año de la formación del anillo. Con el fin de evaluar la productividad forestal por sitio, se elaboraron series promedio de IAB, promediando mediciones de aquellos arboles con fustes circulares y estadísticamente significativos en el fechado.

#### 1.3.6 Información climática

Dado que no existen datos climáticos en la parte alta de la montaña Jocotitlán, se recurrió a datos meteorológicos de ocho estaciones ubicadas alrededor de la montaña (Cuadro 2). Los datos de clima se extrajeron con el software de

Extracción Rápido de Información Climatológica (ERIC V2). Las variables utilizadas fueron la precipitación mensual, temperatura media, mínima y máxima del mes; promediando datos disponibles de las ocho estaciones cercanas. El periodo de registros instrumentales que se combinó con las estaciones disponibles abarcó el periodo de 1961 a 2010.

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas alrededor del Cerro de Jocotitlán, Estado de México, empleadas para extraer datos de temperatura y precipitación.

Clave	Nombre	Altitud (m)	Latitud	Longitud
15009	Atlacomulco (smn)	2560	19°48'0"	99°52'59"
15072	Presa Embajomuy	2670	19°42'36"	99°56'42"
15078	Presa Francisco Trinidad	2718	19°49'30"	99°47'28"
15139	Atlacomulco I (DGE)	2550	19°47'46"	99°53'28"
15208	Pozo cuatro	2538	19°42'40"	99°49'48"
15251	Atlacomulco II (DGE)	2574	19°47'53"	99°52'26"
15278	Santiago Acutzilapan	3061	19°45'36"	99°45'32"
15390	ETA 013 Jocotitlán	2650	19°42'40"	99°47'20"

### 1.3.7 Correlación entre el IAA y variables climáticas

Para evaluar la respuesta climática de *Pinus hartwegii* en Jocotitlán, se correlacionó el IAA de la serie general (los cuatro sitios) del área de estudio con los promedios mensuales de temperatura media, mínima, máxima y precipitación, obtenidos de las ocho estaciones meteorológicas cercanas al Cerro de Jocotitlán. El indicador de correlación fue el coeficiente de correlación de Pearson realizando un método de re-muestreo (bootstrap) para calcular intervalos de confianza, así como la significancia de las correlaciones con diferentes variables ( $p < 0.05$ ). Se prueba la variación de la correlación variando el número de años y sobre el tiempo se prueba la correlación para los meses del año previo y actual, y por estaciones.

Para ello, se usó la librería *treeclim* en R incluyendo meses del año previo (septiembre) y actuales del crecimiento (diciembre) (Zang and Biondi, 2015).

### 1.3.8 Correlación entre IAB y variables climáticas

Se realizó un análisis de correlación entre el IAB y las variables climáticas que resultaron significativas para IAA, detectadas por la librería de *treeclim*. La variación del IAB también se analizó con base a la edad del cambium para conocer la trayectoria de crecimiento del arbolado en cada uno de los cuatro sitios con diferente altitud y exposición. Con la edad del cambium los datos de IAB se alinean dando el valor de cero, en la escala del tiempo, a la médula independientemente de que los árboles no sean de la misma edad.

## 1.4 Resultados

### 1.4.1 Parámetros de los árboles muestra

Los árboles más jóvenes y de mayor altura se ubicaron en el sitio SO-3700. Las alturas fueron menores en la elevación mayor y el diámetro vario entre altitudes y exposiciones (Cuadro 3).

Cuadro 3. Características dasométricas promedio de árboles muestreados por sitio de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México.

Sitio	Diámetro (cm)	Altura (m)	Edad (años)
	±error estándar	±error estándar	±error estándar
NO-3800	32.83 (±3.35)	11.03 (±1.34)	89.28 (±12.29)
SO-3800	34.63 (±2.10)	13.14 (±2.83)	85.58 (±12.18)
NO-3700	35.13 (±4.84)	14.44 (±2.29)	87.33 (±12.01)
SO-3700	33.18 (±8.43)	16.42 (±4.60)	52.38 (±16.02)

### 1.4.2 Serie de IAA

Los cambios de IAA fueron variables de un árbol a otro. No obstante, con 80 segmentos (63%) se obtuvo una serie de IAA con una correlación entre segmentos de 0.33, ligeramente superior a la mínima satisfactoria que es de 0.32 (Holmes, 1983). El número de mediciones consideradas fue 6058 abarcando un periodo de 1900 a 2016 con una edad media de 75 años y auto-correlación de primer orden de 0.67. Se observaron dos periodos de bajo crecimiento, el primero entre 1950 y 1960, y el segundo entre 1990 y 2005; mientras que los periodos de mayor crecimiento fueron de 1965 a 1985 y en los últimos cinco años (Figura 1).

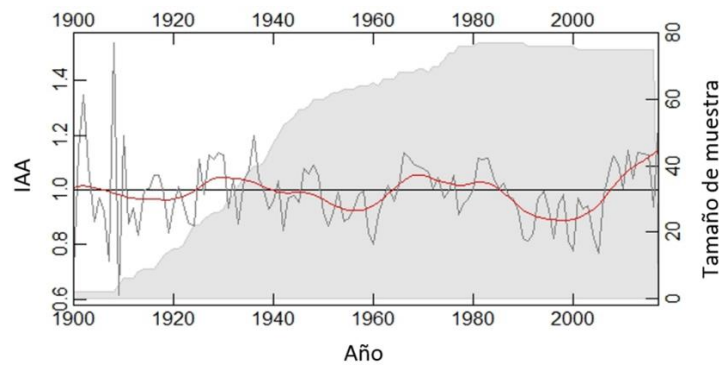


Figura 1. Cronología de IAA de *Pinus hartwegii* generada para la región del Cerro Jocotitlán, Estado de México

### 1.4.3 Incremento en área basal (IAB)

Las series de IAB de los cuatros sitios mostraron un pico de crecimiento en el año 1970 con una disminución posterior a este año. Sin embargo, a diferencia del resto de los sitios, el sitio SO-3700 mostró un incremento constante de IAB a partir de 1978. Excepto por el sitio SO-3700, el IAB se mostró relativamente estable de 1995 a 2015 (Figura 2).

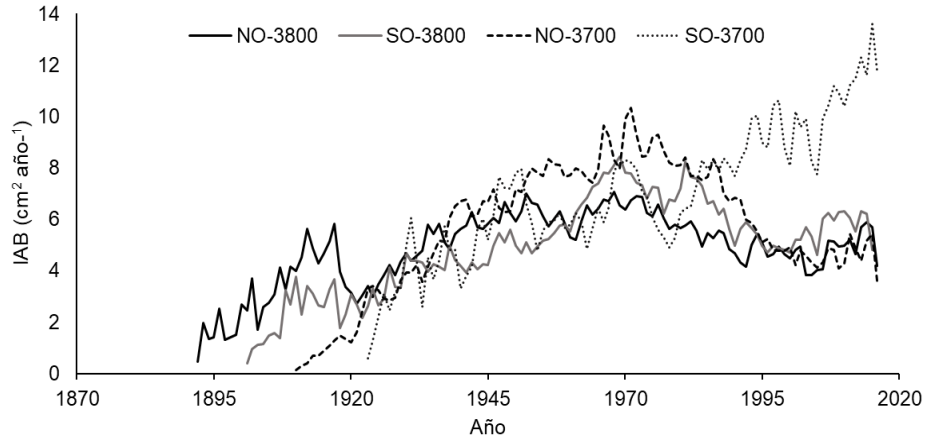


Figura 2. Evolución de incremento en área basal de *Pinus hartwegii* para los cuatro sitios de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México. Prefijos NO=noroeste y SO=suroeste, números después del prefijo corresponden a la altitud.

#### 1.4.4 IAB y edad cambial

La tendencia del IAB de acuerdo con la edad cambial mostró que en todos los sitios los árboles tuvieron su máximo crecimiento en la etapa juvenil entre 20 y 50 años, pero los árboles del sitio SO-3700 superaron al resto de los sitios. Una tendencia que destaca es que aproximadamente a los 80 años, los árboles en todos los sitios convergen en un IAB cercano a  $4 \text{ cm}^2 \text{ año}^{-1}$ . El arbolado de mayor edad en la exposición NO presentó un ligero aumento en IAB después de los 90 años, independientemente de la altitud (Figura 3).



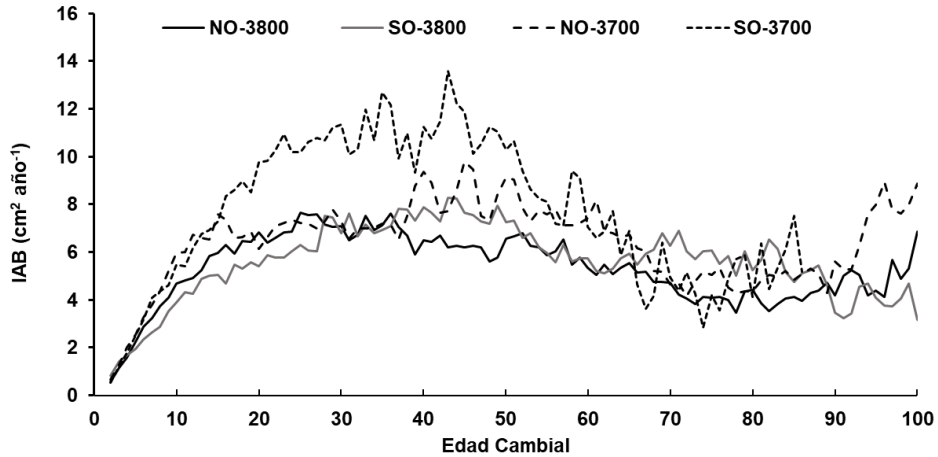


Figura 3. Variación del incremento en área basal (IAB) de *Pinus hartwegii* con respecto a la edad cambial por sitio de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México. Prefijos NO=noroeste y SO=suroeste, números después de prefijos corresponden a la altitud.

#### 1.4.5 Correlación entre IAA y variables climáticas

Las variables climáticas relacionadas estadísticamente ( $P < 0.05$ ) con el IAA fueron: la temperatura de octubre del año previo, el promedio de temperatura de sep-oct del año previo y las temperaturas medias de febrero, marzo y feb-marzo del año actual. Los sitios de 3700 msnm fueron los que mostraron mayor correlación estadística entre valores de IAA y variables climáticas (Cuadro 4).

#### 1.4.6 Correlación entre IAB y variables climáticas

La relación entre IAB y variables climáticas fue estadísticamente más significativa para la temperatura y precipitación del año actual. Destacan los sitios a 3700 m como los más sensibles a la variabilidad climática (Cuadro 5).

Cuadro 4. Correlación entre el índice de anchura de anillo (IAA) y variables climáticas bajo diferente altitud y exposición en el Cerro Jocotitlán.

Period	Variable	Los cuatro sitios	Sitios a 3700 m	Sitios a 3800 m	Sitios al NO	Sitios al SO
Año previo	Tmax octubre	<b>0.314</b>	<b>0.321</b>	<b>0.301</b>	<b>0.354</b>	0.215
	Tmax sep-oct	<b>0.291</b>	<b>0.266</b>	<b>0.291</b>	<b>0.347</b>	0.203
Año actual	<b>Tmed feb</b>	<b>-0.361</b>	<b>-0.374</b>	-0.284	<b>-0.464</b>	-0.219
	<b>Tmed mar</b>	<b>-0.321</b>	<b>-0.388</b>	-0.232	<b>-0.436</b>	-0.123
	Tmed feb-mar	<b>-0.381</b>	<b>-0.418</b>	-0.289	<b>-0.501</b>	-0.191
	PP abr-sep	<b>0.398</b>	<b>0.395</b>	0.293	<b>0.373</b>	<b>0.328</b>

Valores en negritas estadísticamente significativos ( $P < 0.05$ )

Cuadro 5. Correlación entre el incremento en área basal (IAB) y variables climáticas bajo diferente altitud y exposición en el Cerro Jocotitlán.

Period	Variable	Los cuatro sitios	Sitios a 3700 m	Sitios a 3800 m	Sitios al NO	Sitios al SO
Año previo	Tmax octubre	<b>0.314</b>	0.277	0.265	0.23677	0.15976
	Tmax sep-oct	0.266	0.128	0.299	0.23465	0.07379
Año actual	<b>Tmed feb</b>	<b>-0.493</b>	<b>-0.447</b>	<b>-0.404</b>	<b>-0.436</b>	-0.131
	<b>Tmed mar</b>	<b>-0.307</b>	<b>-0.430</b>	-0.145	-0.143	<b>-0.307</b>
	Tmed feb-mar	<b>-0.446</b>	<b>-0.489</b>	<b>-0.307</b>	<b>-0.324</b>	-0.243
	PP abr-sep	<b>0.520</b>	<b>0.407</b>	<b>0.473</b>	<b>0.449</b>	0.159

Valores en negritas estadísticamente significativos ( $P < 0.05$ )

## 1.5 Discusión

### 1.5.1 Series de IAA y IAB

La alta variación de IAA entre árboles pudo haberse debido a la misma variación climática de un sitio a otro. El clima contrastante entre sitios pudo haber originado una respuesta diferenciada en el crecimiento de los árboles. Esto se refleja en la inter-correlación entre segmentos que apenas superó el límite aceptable (0.32). Otros autores que han trabajado con la misma especie pero en diferentes lugares

han obtenido inter-correlaciones superiores 0.55 (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017). La otra razón que explica la baja correlación es que en este estudio se seleccionaron árboles para representar el IAB del sitio y no necesariamente los árboles más sujetos a estrés hídrico y nutrimental como los que se seleccionan para fines de reconstrucción climática (Villanueva Díaz *et al.*, 2015a).

Las condiciones micro-climáticas entre sitios fueron diferentes, particularmente en temperaturas máximas. En el sitio SO-3800 se presentaron temperaturas máximas más altas en la estación de otoño e invierno (Figura 4). A pesar de que el sitio SO-3700 de mejor crecimiento no presentó las temperaturas más altas, fue el sitio con oscilaciones menos amplias; lo que debió haber favorecido a su mejor crecimiento en IAB (Figura4).

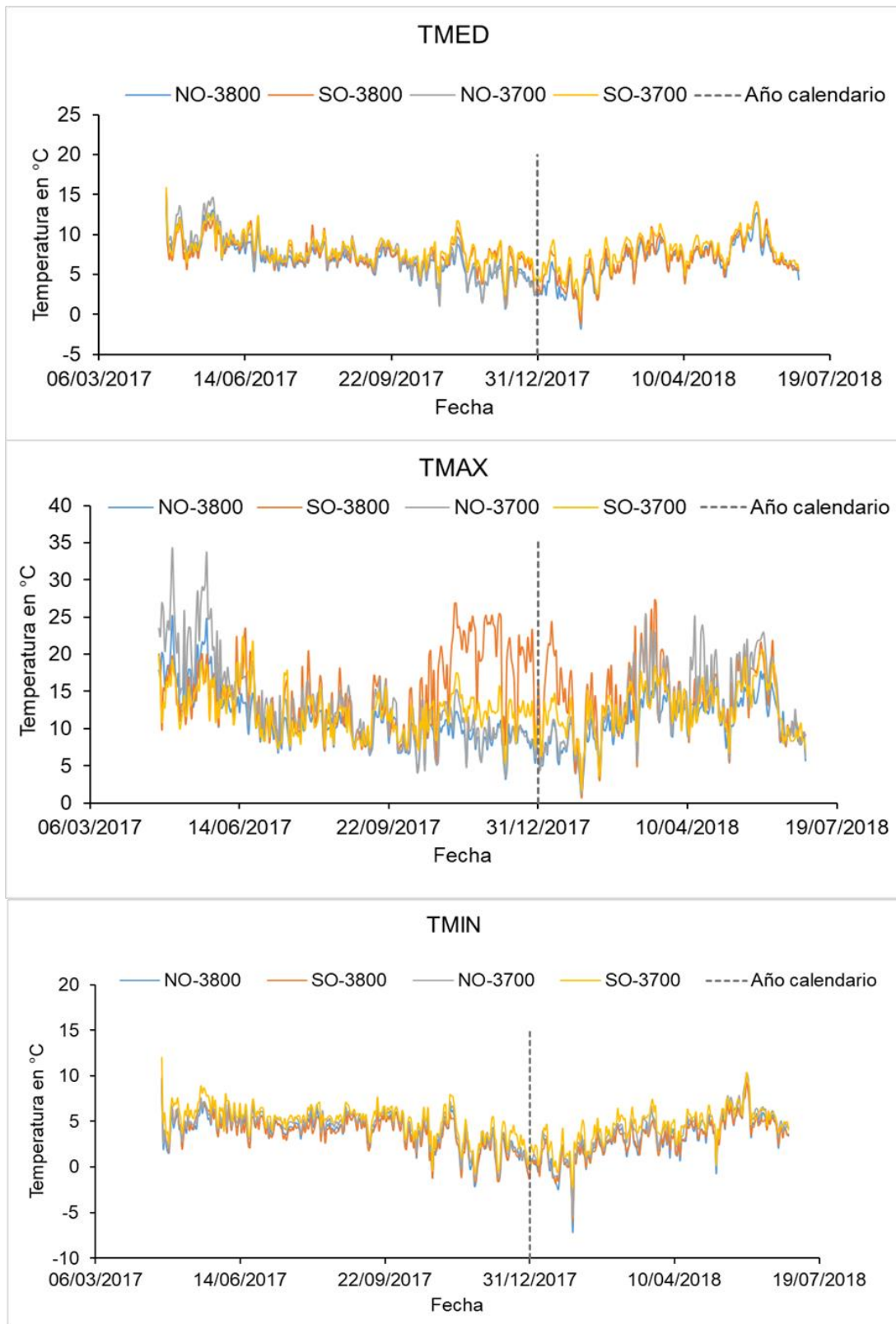


Figura 4. Variación de la temperatura en los sitios de muestreo. Registros obtenidos del datalogger en cada sitio de muestreo. TMED= temperatura media; TMAX= temperatura máxima; TMIN= temperatura mínima.

La temperatura es un factor que determina la actividad del cambium y por lo tanto la xilogenesis (Begum *et al.*, 2018). Un aumento de 0.5 °C en la temperatura media del aire resultó en una activación más temprana del cambium y mayor duración, lo que se tradujo en anillos más anchos en *Pinus leucodermis* Ant. (Deslauriers *et al.*, 2008). Particularmente, el Cerro Jocotitlán, por ser una un volcán aislado sobre una planicie está sujeto a masas de aire frío y humedad en diferentes direcciones que dan lugar a condiciones ambientales contrastantes.

Llama la atención que el sitio SO-3700 fue el único que mostró un aumento constante de IAB desde 1978. En parte se explica porque en este sitio el clima es más favorable para el crecimiento, donde sólo ocurrieron cinco días de temperaturas extremas bajo cero, mientras que en la altitud 3800 los días con extremos bajo cero son diez. Adicionalmente, debe influir la condición del sitio con un suelo más profundo en altitudes más bajas. Los resultados de este estudio indican que temperaturas máximas en otoño (septiembre y octubre) son importantes para el crecimiento radial de *Pinus hartwegii* (Figura 4), posiblemente porque se prolonga la etapa de la actividad cambial (Begum *et al.*, 2018) y esto se observa en un mayor número de traqueidas en los árboles de este sitio que se muestra en el capítulo II.

Dufor y Morin (2012) reportaron que además de la temperatura, la intensidad de luz al comienzo y final de la xilogenesis fué importante para el crecimiento de *Picea mariana* (Mills.). Para especies como *Abies alba* y Silver-fir, la disponibilidad de agua y las temperaturas de otoño-invierno del año previo es importante (Lebuorgeois, 2007), un resultado similar al observado en este estudio.

### 1.5.2 Edad cambial

La tendencia del IAB con respecto a la edad cambial indica que independientemente de las condiciones del sitio, los árboles mostraron un patrón biológico común en el área de estudio, en el que el periodo juvenil entre 20 y 50 años es el de mayor productividad. La baja densidad del arbolado (180 árboles ha<sup>-1</sup>) sugiere que las tendencias observadas no están afectadas por la cercanía entre árboles ya que implica una distancia media entre arboles de 7.5 m.

### 1.5.3 Relación del IAA y IAB con variables climáticas

Comparado con el IAB, el IAA fue más sensible a la temperatura, incluyendo meses de octubre y septiembre del año anterior. Estos meses que corresponden al otoño previo es cuando la actividad cambial disminuye. Sin embargo, la correlación positiva indica cuanto más cálido es el otoño previo, mayor es el crecimiento. Las temperaturas favorables en los meses de septiembre y octubre amplían la estación de crecimiento activo y este efecto fue más notorio en los sitios al NO, donde se espera que haya mayor humedad del suelo y menor radiación solar (Diaconu *et al.*, 2016).

La precipitación de abril a septiembre del año actual explicó el IAB con valores mayores de correlación (0.41 - 0.52) y también fue consistente con el IAA (0.33 - 0.40). Este resultado se explica en parte porque abarca la estación de crecimiento. Además, de acuerdo con la información de las estaciones cercanas, en este periodo se presenta el 83% de la precipitación anual. Varios autores han señalado que la precipitación es más importante que la temperatura para explicar el crecimiento de los anillos y este estudio es congruente con dicho resultado (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2017). Sin embargo, la importancia del

factor precipitación se acentúa en ambientes con temperaturas más altas (Balducci *et al.*, 2013)

Un aspecto por destacar es que la información de las estaciones meteorológicas cercanas indica una disminución de la precipitación anual en la zona de estudio, con una reducción de 2 mm por año. De continuar esta tendencia, es posible que en las próximas décadas las tendencias de crecimiento entre sitios, hasta ahora vistas, se modifiquen favoreciendo los sitios con mayor capacidad para retener humedad en el suelo (Gómez-Guerrero y Doane, 2018).

Los periodos de bajo crecimiento de este estudio cercanos a los años 1960 y dos mil también los reportó Cerano Paredes *et al.* (2014) para *Abies religiosa* en Michoacán. Aunque es difícil saber si ambos eventos están relacionados, se sabe que los patrones registrados por los anillos de las coníferas abarcan regiones geográficas amplias (Villanueva-Díaz *et al.*, 2009).

## 1.6 Conclusiones

La inter-correlación relativamente baja entre muestras de anillos se explicó por la variación climática entre los sitios y al hecho de no incluir exclusivamente árboles estresados. Sin embargo, se pudo conocer la evolución del IAB a dos altitudes y exposiciones diferentes. Los resultados indican que la altitud de 3700m con exposición suroeste tiene el mayor potencial para responder positivamente a la variación climática reciente. Las diferencias en crecimiento entre altitudes y exposiciones resaltan la importancia de considerar esta variación espacio-temporal en los modelos sobre respuesta de los bosques al cambio climático.

## 1.7 Literatura citada

- Astudillo-Sánchez, C. C., J. Villanueva-Díaz, *et al.* 2017. Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees* 31: 441-453. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1460-z>
- Balducci, L., A. Deslauriers, A. Giovannelli, *et al.* 2013. Effects of temperature and water deficit on cambial activity and woody ring features in *Picea mariana* saplings. *Tree Physiology* 33: 1006-1017.  
<https://doi.org/10.1093/treephys/tpt073>
- Begum, S., K. Kudo, M. H. Rahman, *et al.* 2018. Climate change and the regulation of wood formation in trees by temperature. *Trees* 38: 1-13.  
<https://doi.org/10.1007/s00468-017-1587-6>
- Bernal-Salazar, S. y T. Terrazas Salgado. 2000. Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 6: 73-86. <https://doi.org/10.21829/myb.2000.611343>
- Bunn, A. G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26: 115-124.  
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Castruita-Esparza, L. U., A. Correa-Díaz, A. Gómez-Guerrero, *et al.* Ángeles-Pérez. 2016. Basal area increment series of dominant trees of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco show periodicity according to global climate patterns. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22: 379-397.  
[doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.10.048](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.10.048)



- Cerano, P., J., J. Villanueva D., R. Cervantes M., *et al.* 2014. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*: 41-54. <https://doi.org/10.14350/ig.35190>
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, *et al.* 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388. <https://doi.org/10.1023/A:1024835630188>
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47: 37-59.
- Cook, E. R. y K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*: 45-53.
- Cocozza, C., C. Palombo, R. Tognetti, N. La Porta *et al.* 2016. Monitoring intra-annual dynamics of wood formation with microcores and dendrometers in *Picea abies* at two different altitudes. *Tree Physiology* 36: 832-846. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw009>
- Correa-Díaz, A., A. Gómez-Guerrero, J. Villanueva-Díaz, *et al.* 2014. Análisis dendroclimático de ahuehuate (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el centro de México. *Agrociencia* 48: 537-551.
- Correa-Díaz, A., Silva, L., Horwath, W., *et al.* 2019. Linking remote sensing and dendrochronology to quantify climate-induced shifts in high-elevation forests

over space and time. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences.  
doi:<https://doi.org/10.1029/2018JG004687>

Deslauriers, A., S. Rossi, T. Anfodillo y A. J. T. P. Saracino. 2008. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. 28: 863-871.  
<https://doi.org/10.1093/treephys/28.6.863>

Diaconu, D., M. Wassenberg y H. Spiecker. 2016. Variability of European beech wood density as influenced by interactions between tree-ring growth and aspect. Forest Ecosystems 3: 6. <https://doi.org/10.1186/s40663-016-0065-8>

Dufour, B., y H. Morin. 2013. Climatic control of tracheid production of black spruce in dense mesic stands of eastern Canada. Tree Physiology 33: 175-186.

Gao, L. X. Gou, Y. Deng *et al.* 2015. Assessing the influences of tree species elevation and climate on tree ring growth in the Qilian Mountains of northwest China. Trees 31: 393-404. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1294-0>

Gómez-Guerrero, A. y T. Doane. 2018. The Response of Forest Ecosystems to Climate Change. Developments in Soil Science. Elsevier. pp. 185-206.

Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree Ring Bulletin 44: 69-78.

INAFED. 2010. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal de Durango Durango.

- Körner, C. 2007. Climatic treelines: conventions, global patterns, causes (Klimatische Baumgrenzen: Konventionen, globale Muster, Ursachen). *Erdkunde*: 316-324.
- Lebourgeois, F. 2007. Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Ann. For. Sci.* 64:333-343.
- Musálem, M. y M. J. I. M. Solís. 2000. Monografía de *Pinus hartwegii*. SAGAR. INIFAP. CIRCE. Campo Experimental Valle de México. Libro Técnico No. 3. Chapingo, Estado de México. 96 p.
- Poage, N. J. y I. Tappeiner, John C. 2002. Long-term patterns of diameter and basal area growth of old-growth Douglas-fir trees in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1232-1243. <https://doi.org/10.1139/x02-045>
- Pompa-García, M., J. Cerano-Paredes y P. Z. Fulé. 2013. Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia* 31: 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.05.003>
- Villanueva, D., J., P. Z. Fulé, J. Cerano Paredes, *et al.* 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia forestal en México* 34: 37-69.
- Villanueva, D., J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, *et al.* 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83: 117-131. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>

- Villanueva, D., J., J. Cerano Paredes, P. Z. Fulé, *et al* 2015a. Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones geográficas*: 141-153.  
<http://dx.doi.org/10.14350/rig.44485>
- Villanueva, D., J., J. Cerano Paredes, L. Selem Vázquez, *et al*. 2015b. Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. 2015: 5-14.  
<https://doi.org/10.14350/rig.42003>
- Villanueva, D., J., J. C. Paredes, P. Z. Fulé, *et al* 2015c. Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 2015: 141-153.  
<http://dx.doi.org/10.14350/rig.44485>
- Villanueva, D. J., L. Vázquez S., J. Estrada A., *et al* C. 2018. Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9: 165-187.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.128>
- Villanueva, J., A. Gómez, J. Cerano, *et al* 2017. La variabilidad del caudal del río Acajoneta inferida mediante series de anillos de crecimiento en coníferas. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8: 55-74. <http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-04>
- Viveros-Viveros, H., C. Saenz-Romero, J. J. Vargas-Hernández, *et al*. 2009. Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot

phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257: 836-842. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>

Zang, C. y F. Biondi. 2015. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography* 38: 431-436.  
<https://doi.org/10.1111/ecog.01335>

## **CAPÍTULO II. VARIACIÓN EN NÚMERO Y DIÁMETRO DE TRAQUEIDAS DE *Pinus hartwegii* Lindl. EN DIFERENTES ALTITUDES Y EXPOSICIONES**

### 2.1 Resumen

Introducción: Los rasgos estructurales de los anillos de crecimiento definen propiedades funcionales de xilema. Las condiciones ambientales del sitio influyen en los componentes de los anillos de crecimiento, los cuales a su vez son elementos clave para estudios dendroecológicos.

Objetivo: Analizar el número y diámetro de traqueidas en la madera temprana y tardía en los anillos de crecimiento formados en la última década, en dos altitudes (3700 y 3800 m) y exposiciones (NO y SO) diferentes.

Resultados y discusión: El sitio SO-3700 presentó mayor número de traqueidas en madera temprana, tardía y en todo el anillo, que en los otros sitios. Aunque el sitio SO-3700 fue el de mayor crecimiento, no necesariamente el diámetro de traqueadas fue mayor, lo que indica que para el proceso de formación de la madera y el crecimiento radial, son importantes la división y expansión de traqueidas. En los sitios de mayor altitud (3800 m) el diámetro de traqueidas disminuye de la exposición NO a la SO. La interacción Altitud x Exposición fue estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ) para explicar la variación de número y diámetro de traqueidas. Los cambios en temperatura que ocurren por la variación en altitud y exposición explicaron la variación en crecimiento entre sitios.

Conclusiones: La interacción altitud y exposición es importante para comprender el comportamiento en crecimiento actual y futuro de *Pinus hartwegii*. El número y diámetro de traqueidas fue mayor a menores altitudes y en exposición suroeste,

donde se tienen con más frecuencia temperaturas óptimas para la actividad del cambium. La ubicación topográfica del sitio como la altitud y exposición influyen en la temperatura y a su vez en el número y diámetro de traqueidas, dando lugar a una estructura diferente en los anillos de crecimiento.

Palabras clave: número de traqueidas, madera tardía, madera temprana, altitud, exposición.

## 2.2 Introducción

El proceso de formación de madera (xilogénesis) comprende eventos complejos que incluyen la división y expansión celular, así como la biosíntesis y depósito de compuestos en la pared celular secundaria (Plomion *et al.*, 2001). Durante la xilogénesis se generan rasgos estructurales y funcionales de la madera para cada especie (Cocozza *et al.*, 2016; Fonti & Babushkina, 2016). Dado que la formación de la madera depende de las condiciones ambientales, la variación climática reciente puede influir en la organización de componentes de la madera de los árboles, ya que la humedad, temperatura y disponibilidad de nutrientes en el suelo afecta la división y expansión celular (Cuny & Rathgeber, 2016).

La división celular depende de la actividad de los meristemos, los cuales a su vez presentan periodos activos e inactivos en función a los cambios de temperatura y fotoperiodo. La combinación de condiciones húmedas y cálidas promueve la reactivación de los meristemos. Por lo tanto, el cambium vascular presenta patrones de producción y acumulación de elementos traqueales que

componen la madera de acuerdo con las condiciones ambientales (Bernal-Salazar & Terrazas, 2000).

Los anillos de crecimiento son el resultado de la acumulación de tres procesos: división cambial (número de células formadas), expansión celular (determinada por el diámetro del lumen) e incremento en el grosor de la pared celular (Deslauriers *et al.*, 2008). La formación sincronizada de anillos con las estaciones del año son claves para los estudios dendroclimatológicos, ya que la evidencia de clima benigno queda registrada en anillos de mayor anchura y vice versa, dando lugar a la estructura anatómica de la madera (Martin-Benito, Beeckman, & Cañellas, 2013).

Una característica importante del xilema es que su estructura refleja el balance funcional entre la eficiencia para el transporte de agua y el crecimiento óptimo y la resistencia a cavitación (Fonti & Jansen, 2012); por lo tanto, la disponibilidad de agua influye en el proceso de formación de la madera ya que es importante para la actividad metabólica celular y para mantener la turgencia celular (Cuny & Rathgeber, 2016; Fonti & Babushkina, 2016); así, la estructura del xilema también determina el riesgo potencial de colapso hidráulico durante periodos de sequía.

La variación del clima influye en las propiedades mecánicas e hidráulicas del xilema. En la medida que aumenta el déficit de vapor de agua, los árboles dependen principalmente del diferencial de potencial hídrico entre el suelo y la hoja, las áreas de conducción de agua del xilema y área foliar, y de manera importante de la propiedad del sistema para mantener la conducción de agua. Esta propiedad del sistema está determinada por el arreglo y arquitectura de



traqueidas en las coníferas (MacDowell & Allen, 2005). Además, el número de células, estructura y composición también son importantes para definir propiedades funcionales en el xilema (Fonti & Babushkina, 2016).

Para comprender los posibles efectos del cambio climático sobre la formación de madera se debe investigar la respuesta de los árboles ante diferentes condiciones ambientales (Fonti & Babushkina, 2016), como su respuesta a diferente altitud y exposición. El entendimiento de la estructura y arreglo de los anillos de crecimiento en paisajes de montañas elevadas ayudará a explicar la respuesta de los árboles a la variación del clima (Cocozza *et al.*, 2016; Fonti & Babushkina, 2016).

El objetivo de este trabajo fue analizar el número y el diámetro de traqueidas en madera temprana y tardía en anillos de crecimiento de árboles de *Pinus hartwegii* en diferente altitud y exposición en la última década de crecimiento (2006-2016).

## 2.3 Materiales y métodos

### 2.3.1 Área de estudio

El cerro de Jocotitlán (Xocotépetl, nombre en mazahua), se encuentra ubicado en el municipio con el mismo nombre, en las coordenadas 19° 36' 45" Latitud N y 99° 39' 33" Longitud O. El clima predominante en la región es templado subhúmedo (Cw) con lluvias en verano y la temperatura anual va de los 13.2 °C hasta los 31°C y una mínima reportada de 4°C. La precipitación promedio anual es de 1,008 mm con heladas los últimos meses del año y en ocasiones se presentan algunas nevadas (INAFED, 2010).

### 2.3.2 Selección de sitios de estudio

Se consideraron dos niveles altitudinales, 3700 y 3800 m, y dos exposiciones, Noroeste (NO) y Suroeste (SO). El Cuadro 6 indica la distribución de los sitios de estudio. En cada sitio de observación se instaló un registrador electrónico (data logger) para medir la de temperatura y humedad relativa cada cuatro horas durante un año.

Cuadro 6. Distribución de los sitios de estudio en el Cerro de Jocotitlán, Estado de México (NO=noroeste, SO= suroeste).

Sitio	Altitud (m)	Latitud (°)	Longitud (°)
NO-3800	3,800	19°44'32"	99°45'52"
SO-3800	3,800	19°44'29"	99°45'58"
NO-3700	3,700	19.44'36"	99°45'39"
SO-3700	3,700	19°44'23"	99°46'05"

La posición altitudinal exacta de los sitios tiene una variación de  $\pm 12$ m.

### 2.3.3 Colecta de núcleos de madera

En cada sitio se seleccionaron 16 árboles sanos, dominantes o co-dominantes y con fuste recto. De cada árbol se extrajeron dos núcleos de crecimiento a 1.3 m de altura sobre el suelo en sentido opuesto, utilizando un taladro de Pressler de 6 mm de diámetro. En total se obtuvieron 32 segmentos de crecimiento en cada sitio. Para realizar el recuento de traqueidas, se seleccionaron, en forma aleatoria, cinco de los 32 segmentos de árboles diferentes (Cuadro 7), sobre los cuales se realizaron mediciones de número y diámetro de traqueidas en la última década.

Cuadro 7. Muestras de árboles de *Pinus hartwegii* Lindl. tomadas por sitio de muestreo para el recuento de traqueidas durante la última década de crecimiento (2006-2016).

	Muestra	Clave	Diámetro (cm)	Altura (m)	Edad (años)
	1	A2JOC1A	30.7	11	83
	2	A5JOC1A	30.5	11.5	80
NO-3800	3	A7JOC1B	30	10	98
	4	A11JOC1B	31.7	9	76
	5	A13JOC1B	40	14	80
	1	A4JOC2B	33.1	15	70
	2	A7JOC2B	33.1	15	77
SO-3800	3	A9JOC2B	38.8	15	84
	4	A11JOC2B	33.6	11	75
	5	A15JOC2B	32.8	14	75
	1	A2JOC3B	39	13	105
	2	A5JOC3B	29.3	10	78
NO-3700	3	A7JOC3B	38.8	14.5	91
	4	A8JOC3B	39.1	16.5	87
	5	A14JOC3B	34.5	16	97
	1	A1JOC4B	42	17	52
	2	A3JOC4B	44	15.5	97
SO-3700	3	A10JOC4B	37	14.5	47
	4	A11JOC4B	34.1	16	55
	5	A14JOC4B	35.8	16	66

#### 2.3.4 Preparación de las muestras

Las muestras se montaron en soportes de madera con pegamento blanco y etiquetadas de acuerdo con el sitio muestreado. Una vez secas, con propósito de tener un pulido fino que permita visualizar las células para su conteo, se lijaron con lijas de diferente granulometría que van desde el número 80 hasta 1000. Al terminar el pulido, las muestras se sopletearon con ayuda de un compresor Torzam de 50 Lts. ½ Hp para remover el polvo y visualizar de manera más clara las traqueidas, bajo el microscopio. Una vez hecho el procedimiento anterior fue posible realizar el recuento de traqueidas.

#### 2.3.5 Medición del ancho de anillo, madera temprana y madera tardía

Las muestras se escanearon en un escáner marca EPSON a una resolución de 600 dpi. Sobre las imágenes escaneadas se realizaron mediciones de anchura de anillo, madera tardía y madera temprana con el software WinDENDRO® (Density 2016 Regent Instruments Inc.).

#### 2.3.6 Recuento de traqueidas

El recuento de traqueidas de la última década se realizó en imágenes fotográficas de anillos de crecimiento. Las fotografías se obtuvieron con un microscopio estereoscópico (Carl Zeiss Stereo Discovery V20) con el objetivo uno a un aumento de 50X. El recuento de células de madera temprana, tardía y totales por anillo de crecimiento se realizó a lo largo de cinco filas radiales utilizando el software Image J®.

### 2.3.7 Estimación de diámetro promedio de traqueidas

La estimación del diámetro promedio de traqueidas se determinó con las mediciones del ancho de madera tardía, madera temprana y el ancho de anillo total que se obtuvo del software WinDENDRO®. Para lo anterior, el ancho de madera tardía, temprana y total se dividió entre el número de traqueidas en madera tardía, en madera temprana y totales para estimar el diámetro promedio de las traqueidas.

## 2.4 Análisis estadístico

Se estimaron valores promedio del número y diámetro de traqueidas en madera temprana, madera tardía y anillo total. Previo al análisis estadístico las variables se transformaron a logaritmo base 10 para cumplir con el criterio de normalidad. El análisis estadístico consistió en un análisis de varianza considerando los dos niveles de altitud y de exposición. Se evaluó el efecto de altitud, exposición y de su interacción. También se hizo una comparación de medias entre los cuatro sitios con la prueba de Tukey. Todas las pruebas estadísticas se consideraron significativas con un valor de  $P \leq 0.05$ .

## 2.5 Resultados

### 2.5.1 Número medio de traqueidas

Los sitios con mayor y menor número de traqueidas en madera temprana fueron el SO-3700 y NO -3700, respectivamente (Figura 5).

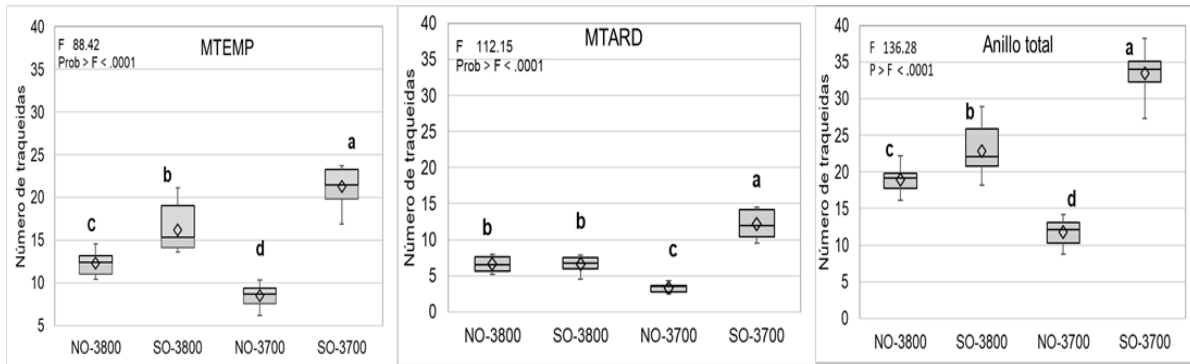


Figura 5. Número medio de traqueidas en anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii* sumados en la última década (2006-2016), para sitios con diferente altitud y exposición (sitios con una letra en común no son estadísticamente diferentes). MTEMP= madera temprana; MTARD= madera tardía.

El análisis estadístico para número de traqueidas en madera temprana indicó que la interacción Altitud x Exposición fue significativa (66.23, <0.001). Asimismo, el análisis indicó que la exposición influye de manera significativa en el número de traqueidas en madera temprana (221.99, <0.001). En la exposición NO, el número de traqueidas en madera temprana aumentó con la altitud, mientras que en la exposición SO, el número de traqueidas fue mayor en la exposición SO (3700 m).

El análisis estadístico indicó que para el número de traqueidas en madera tardía la interacción Altitud x Exposición fue significativa (193, <0.001). Del mismo modo, el efecto de la exposición en el número de traqueidas resultó ser significativo para madera tardía (191.96, <0.001). En este caso, el número de traqueidas en madera tardía no es diferente entre los sitios de mayor altitud (3800 m). En cambio, en los sitios de altitud más baja (3700 m) el número de traqueidas fue mayor en la exposición SO.

El número de traqueidas en anillo total fue superior en el sitio SO-3700. El análisis estadístico para número de traqueidas en anillo total indicó que la interacción Altitud x Exposición fue significativa (137.24, <0.001). No obstante, el efecto exposición para el número de traqueidas en anillo total fue también estadísticamente significativo (279.48<0.001). En este caso el número de traqueidas en anillo total aumenta de la exposición NO a la SO; sin embargo, el aumento es más drástico en altitudes bajas (3700 m).

### 2.5.2 Diámetro de traqueidas

Respecto al diámetro de traqueidas para madera tardía se observó alta variabilidad en los datos, por lo que solo son mostrados como resultado. Con relación al diámetro de traqueidas en madera temprana y en anillo total sólo se observaron diferencias significativas en madera temprana (Figura 6).

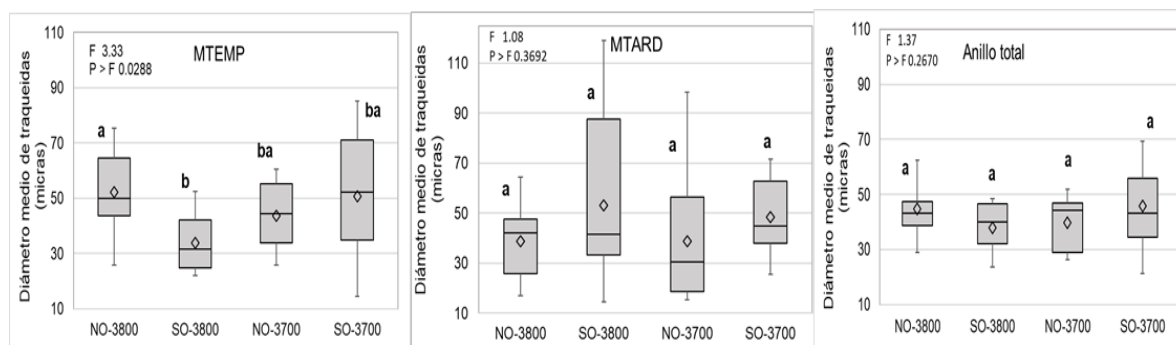


Figura 6. Diámetro medio de traqueidas en anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii* sumados en la última década (2006-2016), para sitios con diferente altitud y exposición (sitios con una letra en común no son estadísticamente diferentes). MTEMP= madera temprana; MTARD= madera tardía.

La interacción Altitud x Exposición para diámetro de traqueidas en madera temprana fue significativa (5.8, <0.0208). Sólo en los sitios de mayor altitud (3800 m) el diámetro disminuye de la exposición NO a la SO.

### 2.5.3 Número y diámetro de traqueidas en el tiempo

El análisis en el tiempo no indicó variación en la última década para ningún sitio. Sin embargo, el sitio SO-3700 tuvo valores estadísticamente mayores en número y diámetro de traqueidas que el resto de los sitios (Figura 7).

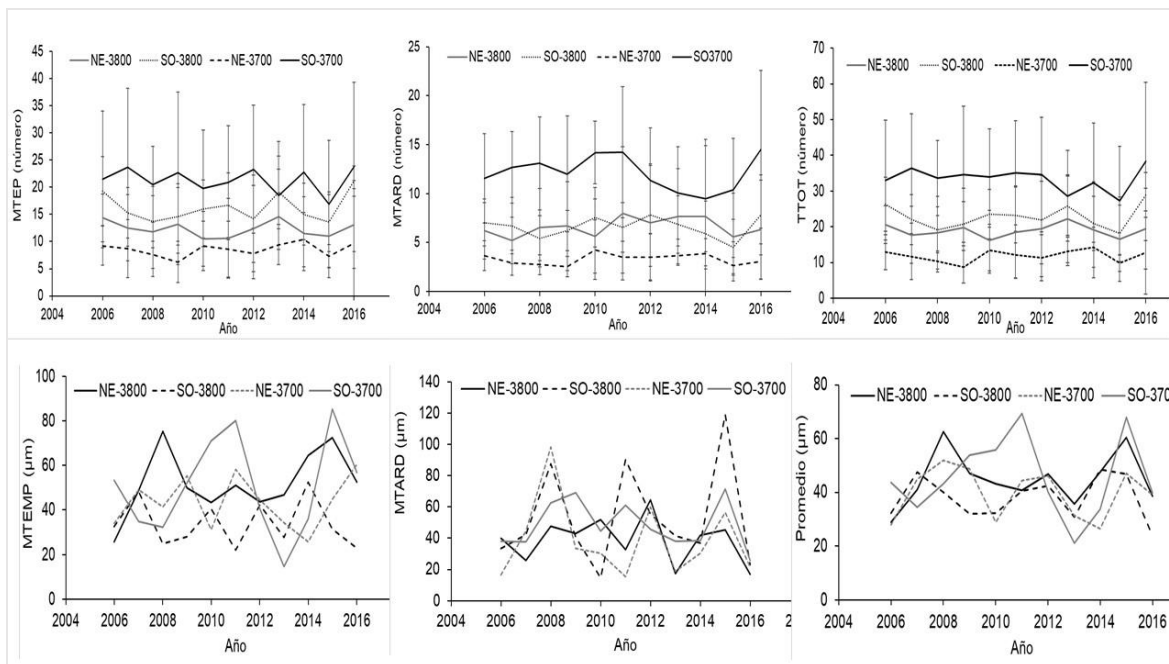


Figura 7. Variación temporal del número (superior) y diámetro (inferior) de traqueidas en *Pinus hartwegii* durante la década de 2006 a 2016 MTEMP= madera temprana; MTARD= madera tardía; TTOT= traqueidas totales.

## 2.6 Discusión

### 2.6.1 Variación en el número de traqueidas

La variación en número de traqueidas entre sitios puede estar relacionada con las condiciones microclimáticas. Coccozza *et al.* (2016), reportaron que el número de células del xilema de *Picea abies* fue mayor en altitudes más bajas donde las temperaturas son mayores. La relación inversa entre la altitud y temperatura explican este resultado ya que la actividad cambial y diferenciación celular están determinadas por la temperatura (Balducci *et al.*, 2013).



El mayor número de traqueidas y diámetro en el sitio SO-3700 está relacionado con temperaturas más favorables para el crecimiento en la estación de crecimiento y a principios del otoño. En los sitios de altitud 3800 la temperatura fue menor y el número de días con temperaturas extremas bajo cero mayor (Figura 8). Deslauries *et al.* (2008) mostraron resultados similares con *Pinus leucodermis*, e indicaron que además del aumento de la temperatura para favorecer en crecimiento radial, es importante también el número de días al año en los que las especie forestales mantienen la actividad cambial.

El estado hídrico del árbol es otro factor determinante en la división celular (Abe *et al.* 2003; Balducci *et al.* 2013) lo que al final resulta en mayor número de células y en mayor crecimiento radial (Coccoza *et al.* 2016). Aunque en este estudio no se midió el potencial hídrico de los árboles es probable que hasta el momento la disponibilidad de agua del suelo no sea un factor determinante para el número de traqueidas en los anillos, ya que las condiciones más secas se esperan en sitios expuestos al sur y en altitudes bajas, que son las que correspondieron al sitio SO-3700 con mayor crecimiento radial.

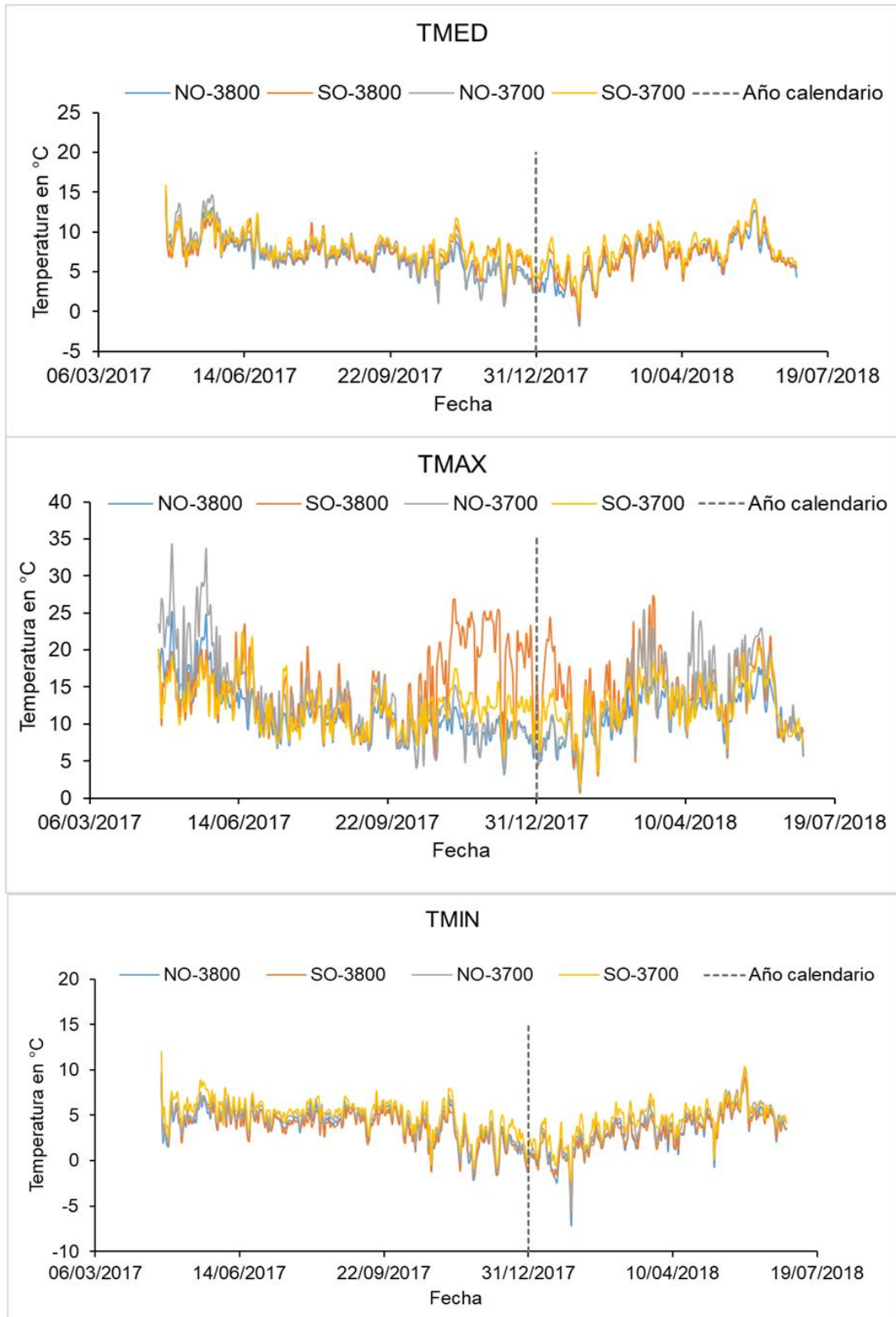


Figura 8. Variación de la temperatura en los sitios de muestreo. Registros obtenidos del datalogger en cada sitio de muestreo. TMED= temperatura media; TMAX= temperatura máxima; TMIN= temperatura mínima.

### 2.6.2 Variación en diámetro de traqueidas

El hecho de que el diámetro de traqueidas en madera temprana del sitio SO-3800 haya sido menor, pero no su número de traqueidas, indica que los árboles modulan el proceso de división y expansión celular de acuerdo con las condiciones ambientales de cada sitio. En la exposición NO la tasa de expansión de traqueidas fue mayor con diámetros de hasta 65  $\mu\text{m}$ ; sin embargo, la baja temperatura durante el año, comparada con el sitio de exposición SO, limita la continuidad de formación de traqueidas. La falta de diferencias estadísticas del diámetro de traqueidas en madera tardía, indica que una vez que la actividad cambial disminuye en la estación de otoño, por las bajas temperaturas, la expansión de traqueidas es similar entre sitios, aunque si fue evidente una variación más amplia para el sitio SO-3800 donde el diámetro de traqueidas alcanzó valores extremos de hasta 119  $\mu\text{m}$ .

Abe *et al.* (2003), demostraron que en *Cryptomeria Japonica* uno de los factores determinantes en el diámetro celular y división cambial fue la disponibilidad de agua. No es posible en este estudio conocer las diferencias en disponibilidad de agua del suelo entre sitios, pero indirectamente la mayor profundidad del suelo y lámina de agua a altitudes más bajas, acompañado de mayor temperatura, podría favorecer periodos más largos para la división y expansión celular.

Pacheco *et al.* (2015) encontraron que en *Pinus halapensis* Mill. las condiciones húmedas en la estación de crecimiento resultan en anillos más anchos, con mayor número y diámetro de traqueidas. Es importante mencionar que diámetro mayor en células del xilema es importante en términos de

crecimiento, pero funcionalmente hacen más vulnerables a la cavitación a los árboles, por lo que los beneficios de un incremento en la temperatura están sujetos a que no se presenten sequías extremas.

### 2.6.3 Variación en número y diámetro de traqueidas en el tiempo

A pesar de que, durante la década estudiada entre sitios, en el análisis en el tiempo no se mostraron diferencias significativas, todos los sitios muestran una tendencia de incremento en el año 2016. En particular el sitio SO-3700, que superó al resto de los sitios, en 2016 presentó un promedio de 23 ( $\pm 15$ ) y 14 ( $\pm 8$ ) traqueidas, para madera temprana y tardía, respectivamente. Por lo anterior, este sitio tuvo anillos de crecimiento más anchos.

Los resultados indicaron que el crecimiento de *Pinus hartwegii* a mayores altitudes se comporta de manera similar a pesar de crecer en exposiciones diferentes; mientras que el crecimiento a bajas altitudes (3700) si es influenciado por la exposición.

No obstante, es importante mencionar que la respuesta en crecimiento de los árboles puede variar entre especies ante distintas condiciones climáticas; por ejemplo, algunas especies responden positivamente a temperaturas más cálidas mostrando un crecimiento acelerado, mientras que para otras especies el incremento en la temperatura no es favorable y conduce a incrementos en mortalidad (Gao *et al.*, 2017).

Leonelli *et al.* (2009) consideran que el factor exposición tiene una función importante en la modulación de la sensibilidad ya que los árboles se encuentren

expuestos a diferente temperatura y humedad relativa por la variación en la energía radiante recibida.

Gao *et al.* (2017) reportan que para la especie *Qinghai spruce* (*Picea crassifolia*), los patrones de crecimiento son similares a pesar de encontrarse a elevaciones diferentes, aunque en este estudio no comparan exposiciones, sí resalta que los efectos de la elevación sobre el crecimiento del árbol son muy complejos y estrechamente relacionados con el clima y las condiciones topográficas regionales.

## 2.7 Conclusiones

La interacción entre altitud y exposición es muy importante para comprender el comportamiento en crecimiento actual y futuro de *Pinus hartwegii*. El número y diámetro de traqueidas fue mayor a menores altitudes y en exposición suroeste, donde se tienen con más frecuencia temperaturas favorables para la actividad del cambium. La ubicación topográfica del sitio como la altitud y exposición influyen en la temperatura y a su vez en el balance de número y diámetro promedio de traqueidas, dando lugar a una estructura diferente en los anillos de crecimiento. No obstante, se recomienda hacer estudios con cortes anatómicos para contribuir a la aportación de los resultados presentados.

## 2.8 Literatura citada

- Abe, H., T. Nakai, Y. Utsumi and A. Kagawa. 2003. Temporal water deficit and wood formation in *Cryptomeria japonica*. *Tree Physiology* 23: 859-863.
- Balducci, L., A. Deslauriers, A. Giovannelli, S. Rossi and C. B. K. Rathgeber. 2013. Effects of temperature and water deficit on cambial activity and woody ring features in *Picea mariana* saplings. *Tree Physiology* 33: 1006-1017.
- Bernal-Salazar, S., y T. Terrazas S. 2000). Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 6(1):73-86.
- Cocozza, C., Palombo, C., Tognetti, R., *et al.* 2016). Monitoring intra-annual dynamics of wood formation with microcores and dendrometers in *Picea abies* at two different altitudes. *Tree Physiology*, 36(7), 832-846. [doi:10.1093/treephys/tpw009](https://doi.org/10.1093/treephys/tpw009)
- Cuny, H., y Rathgeber. (2016). Xylogenesis: " Coniferous trees of temperate forests are listening to the climate tale during the growing season, but only remember the last words!". *Plant Physiology* 171: 306-317. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.16.00037>
- Deslauriers, A., S. Rossi, T. Anfondillo and A. Saracino. 2008. Cambial phenology, wood formation and temperature thersholds in two constrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiology* 28: 863-871.
- Fonti, P., & Babushkina, (2016). Tracheid anatomical responses to climate in a forest-steppe in Southern Siberia. *Dendrochronologia* 39: 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.09.002>

Fonti, P., y Jansen. (2012). Xylem plasticity in response to climate. *New Phytologist* 195: 734-736.

<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04252.x>

Gao, L., X. Gou, Y. Deng, M. Yang and F. Zhang. 2017. Assessing the influences of tree species, elevation and climate on tree-ring growth in the Qilian Mountains of northwest China. *Trees* 31:393-304.

INAFED, E. d. P. (2010). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México: Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal Durango Durango.

Leonelli, G., M. Pelfini, G. Battipaglia and P. Cherubini. 2009. Site-aspect influence on climate sensitivity over time of a high-altitude *Pinus cembra* tree-ring network. *Climatic Change* 96 (12), 185-201.

<https://doi.org/10.1007/s10584-009-9574-6>

Martin-Benito, D., Beeckman, H., & Cañellas. (2013). Influence of drought on tree rings and tracheid features of *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a mesic Mediterranean forest. *European Journal of Forest Research* 132(1), 33-45.

<https://doi.org/10.1007/s10342-012-0652-3>

Pacheco, A., J.J. Camarero and M. Carrer. 2015. Linking wood anatomy and xylogenesis allows pinpointing of climate and drought influences on growth of coexisting conifers in continental Mediterranean climate. *Tree Physiology* 36,502-512. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv125>

Plomion, C., G. Leprévost and A. Stokes. 2001. Wood formation in trees. *Plant Physiology* 127, 1513-1523. <https://doi.org/10.1104/pp.010816>

## CONCLUSIÓN GENERAL

Se generaron series de índice de anchura de anillo (IAA) e incremento en área basal (IAB) a dos altitudes y exposiciones diferentes, y los resultados indican que la altitud de 3700 con exposición suroeste tiene el mayor potencial para responder positivamente a la variación climática reciente. Se pudo generar una serie de índice de ancho de anillo con una correlación de 0.33 que permitió identificar periodos de bajo y alto crecimiento.

El número y diámetro de traqueidas fue mayor a menores altitudes y en exposición suroeste. Estos factores nos ayudan a comprender el comportamiento del crecimiento de *Pinus hartwegii* en el Cerro de Jocotitlán ante diferentes condiciones ambientales y topográficas que repercuten en la formación y características de sus anillos de crecimiento.

Asimismo, se recomienda continuar con estudios más precisos como cortes anatómicos de la madera que pueden reforzar los resultados obtenidos sobre la variación en número y diámetro de traqueidas y a la variación en micro-densidad de madera.