Scientific article http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.04.036

Radial growth in *Pinus patula* Schltdl. & Cham. and its relationship with growing space and climatic factors

Crecimiento radial en *Pinus patula* Schltdl. & Cham. y su relación con el espacio de crecimiento y los factores climáticos

Luz M. Reyes-Cortés[1]; J. Jesús Vargas-Hernández[2*]; Arnulfo Aldrete[2]; Armando Gómez-Guerrero[2]; J. Amador Honorato-Salazar[3]

[1]Biodiversidad Oaxaqueña, S. C. Niño Perdido 306, Santa María Ixcotel. C. P. 71229. Santa Lucía del Camino, Oaxaca.
[2]Colegio de Postgraduados, Postgrado en Ciencias Forestales. km 36.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México.
[3]Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo experimental San Martinito. km 56.5 carretera México-Puebla. C. P. 74100. Tlahuapan, Puebla, México.
*Corresponding author: vargashj@colpos.mx; tel.: +52 595 952 0200 ext. 1469.

Abstract

Introduction: Annual variation in growth ring characteristics has an impact on productivity and wood quality.
Objective: To evaluate radial growth in two *Pinus patula* Schltdl. & Cham. plantations of different ages and thinning intensity, as well as its relationship to interannual variation in temperature and rainfall.
Materials and methods: Growth ring characteristics were analyzed in wood samples from 13- and 23-year-old plantations, subjected to three thinning intensities (null, light and moderate). The characteristics were related to climate data during the years of ring formation using Pearson's correlation analysis.
Results and discussion: In the 1995 plantation, ring characteristics did not show significant differences ($P > 0.10$) between plots with and without thinning, due to excessive competition and crown recession. Ring width, and early and latewood width, was significantly associated ($P < 0.10$; $r \geq 0.40$) with average minimum temperature. In the 2005 plantation, trees from the thinned plots showed greater ring width, earlywood width and basal area increment than those from the unthinned plot. In this plantation only latewood width was positively associated ($P < 0.10$; $r = 0.69$) with temperature and negatively ($P < 0.10$; $r = -0.61$) with annual rainfall.
Conclusion: Growing space and competition intensity mainly affected ring and earlywood width. Environmental factors influence ring characteristics.

Keywords: Thinning; growth rings; competition; earlywood; latewood.

Resumen

Introducción: La variación anual de las características de los anillos de crecimiento tiene repercusiones en la productividad y calidad de la madera.
Objetivo: Evaluar el crecimiento radial en dos plantaciones de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. de diferente edad e intensidad de aclareo, y su relación con la variación interanual de temperatura y precipitación.
Materiales y métodos: Las características de los anillos de crecimiento se analizaron en muestras de madera de plantaciones de 13 y 23 años, sometidas a tres intensidades de aclareo (nulo, ligero y moderado). Las características se relacionaron con los datos climáticos de los años de formación de los anillos mediante análisis de correlación de Pearson.
Resultados y discusión: En la plantación 1995, las características de los anillos no mostraron diferencias significativas ($P > 0.10$) entre las parcelas con y sin aclareo, debido al exceso de competencia y recesión de la copa. La anchura de anillo, de madera temprana y tardía se asociaron significativamente ($P < 0.10$; $r \geq 0.40$) con la temperatura mínima promedio. En la plantación 2005, los árboles de las parcelas con aclareo mostraron anchura de anillos, anchura de madera temprana e incremento en área basal mayores que los de la parcela sin aclareo. En esta plantación solo la anchura de madera tardía se asoció positivamente con la temperatura ($P < 0.10$; $r = 0.69$) y negativamente con la precipitación anual ($P < 0.10$; $r = -0.61$).
Conclusión: El espacio de crecimiento y la intensidad de competencia afectaron principalmente la anchura de anillo y de madera temprana. Los factores ambientales influyen en las características de los anillos.

Palabras clave: Aclareo; anillos de crecimiento; competencia; madera temprana; madera tardía.

Please cite this article as follows (APA 6): Reyes-Cortés, L. M., Vargas-Hernández, J. J., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., & Honorato-Salazar, J. A. (2020). Radial growth in *Pinus patula* Schltdl. & Cham. and its relationship with growing space and climatic factors. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *26*(2), 157–172. doi: 10.5154/r.rchscfa.2019.04.036

Received: April 22, 2019 / Accepted: November 27, 2019.

Introduction

Forest plantations play an important role in meeting the world's needs for fiber and wood (Schimleck, Antony, Dahlen, & Moore, 2018). Therefore, breeding programs focus on priority species to increase productivity (McKeand, Mullin, Byram, & White, 2003) using intensive silviculture practices. Productivity results from the balance between physiological growth potential (photosynthetic activity and water and nutrient uptake capacity) and space-related growth constraints (competition with other individuals and limited resource availability) (Álvarez-Taboada, Barrio-Anta, Gorgoso-Varela, & Álvarez-González, 2003).

The initial spacing of trees influences the scheduling of silvicultural treatments (Hébert et al., 2016). The ideal combination of growth space with rotation age, site quality and silvicultural treatments, particularly pruning and thinning, favors wood properties (Guerra-Bugueño, Célis-Mosqueira, & Moreno-García, 2014; Hébert et al., 2016). Spacing influences total volume, stem shape, growth rings, juvenile wood, and branch length and diameter (Macdonald & Hubert, 2002).

Climate is a determining factor in growth ring characteristics (Haghshenas et al., 2016). Several studies relate radial growth rate and ring characteristics to environmental variables such as temperature, rainfall, and light intensity (García-Suárez, Butler, & Baillie, 2009), as well as changes in ring characteristics to altitudinal gradients (Hernández & Castellanos, 2006). For example, rainfall during winter and early spring greatly influences radial growth of *Pinus halepensis* Mill., especially earlywood formation (Olivar, Bogino, Spiecker, & Bravo, 2012; Olivar, Rathgeber, Ordóñez & Bravo, 2013). In *Pinus patula* Schltdl. & Cham. it has been shown that populations located at a higher elevation are less productive than those at a lower elevation; however, the opposite may also be true if lower elevation populations are at the lowest limit of the species' natural distribution range (Salazar et al., 1999). Because of this, the width of growth rings and their components (early and latewood) are important and reliable variables for assessing the effect of the environment and growing space on productivity and wood quality (Zhu, Scott, Scallon, & Myers, 2007). Knowledge of this relationship facilitates the study of wood properties and allows separating the effect of age associated with the physiological processes of trees, with respect to the effect of the site's environmental factors.

The overall objective of this study was to evaluate the radial growth of *P. patula* in two plantations with different ages and thinning intensity, as well as its relationship with interannual variation in temperature and rainfall. The specific objectives were a) to evaluate the effect of growing space on tree radial growth; b) to

Introducción

Las plantaciones forestales desarrollan un papel importante para satisfacer las necesidades mundiales de fibra y madera (Schimleck, Antony, Dahlen, & Moore, 2018). Por ello, los programas de mejoramiento genético se centran en especies prioritarias para aumentar la productividad (McKeand, Mullin, Byram, & White, 2003), utilizando silvicultura intensiva. La productividad resulta del balance entre el potencial de crecimiento fisiológico (actividad fotosintética y capacidad de absorción de agua y nutrientes) y las restricciones de crecimiento debido al espacio (competencia con otros individuos y disponibilidad limitada de recursos) (Álvarez-Taboada, Barrio-Anta, Gorgoso-Varela, & Álvarez-González, 2003).

El espaciamiento inicial de los árboles influye en la programación de los tratamientos silvícolas (Hébert et al., 2016). La combinación ideal del espacio de crecimiento con la edad de rotación, calidad del sitio y tratamientos silvícolas, en particular podas y aclareos, favorece las propiedades de la madera (Guerra-Bugueño, Célis-Mosqueira, & Moreno-García, 2014; Hébert et al., 2016). El espaciamiento influye en el volumen total, forma del fuste, anillos de crecimiento, madera juvenil, y longitud y diámetro de ramas (Macdonald & Hubert, 2002).

El clima es un factor determinante en las características de los anillos de crecimiento (Haghshenas et al., 2016). Varios estudios relacionan la tasa de crecimiento radial y las características de los anillos con variables ambientales como la temperatura, precipitación e intensidad luminosa (García-Suárez, Butler, & Baillie, 2009), así como los cambios de las características de los anillos con los gradientes altitudinales (Hernández & Castellanos, 2006). Por ejemplo, la precipitación durante el invierno y principios de la primavera influyen en gran medida en el crecimiento radial de *Pinus halepensis* Mill., especialmente en la formación de madera temprana (Olivar, Bogino, Spiecker, & Bravo, 2012; Olivar, Rathgeber, Ordóñez & Bravo, 2013). En *Pinus patula* Schltdl. & Cham. se ha demostrado que las poblaciones ubicadas a mayor elevación son menos productivas que las de menor elevación; sin embargo, también puede ocurrir lo contrario si las poblaciones de menor elevación se encuentran en el extremo inferior del límite de distribución natural de la especie (Salazar et al., 1999). Debido a lo anterior, la anchura de los anillos de crecimiento y de sus componentes (madera temprana y tardía) son variables importantes y confiables para evaluar el efecto del ambiente y del espacio de crecimiento sobre la productividad y la calidad de la madera (Zhu, Scott, Scallon, & Myers, 2007). El conocimiento de esta relación facilita el estudio de las propiedades de la madera y permite separar el efecto de la edad asociado a los procesos

evaluate the effect of plantation age on tree response to growing space; and c) to estimate the correlation between radial tree growth and temperature and rainfall conditions during the year of ring formation.

Materials and methods

Study area

The study was conducted in two *P. patula* plantations in the community of Ixtlán de Juárez, Oaxaca. The first one was established in 1995, at an elevation of 2 538 m (17° 22' 38.3" N and 96° 28' 43.2" W), with 1.5 x 1.5 m initial spacing (4 444 trees·ha^{-1}). The second one was established in 2005, at an elevation of 2 877 m (17° 40' 17.6" N and 96° 46' 05.3" W), with 2.5 x 2.5 m spacing (1600 trees·ha^{-1}).

At each plantation, 10 trees were evaluated from each of three 400 m^2 (20 x 20 m) plots, which included two thinned and one unthinned plot. The 1995 plantation was thinned in 2004, 2008 and 2017, in accordance with the management plan established by the forestry technical service provider in the community. In the third thinning (2017), 20 % (plot 1) and 28 % (plot 2) of trees per hectare were removed. Thinning in the 2005 plantation was done in 2016, removing 16 % (plot 1) and 26 % (plot 2) of trees, according to the established management plan. The estimated density of these plots, before thinning, was 1 400 trees·ha^{-1} (plot 1) and 950 trees·ha^{-1} (plot 2). In 2018, diameter at breast height and total height measurements were made, and basal area and total volume of the plots in each plantation were estimated (Table 1).

fisiológicos del árbol, con respecto al efecto de los factores ambientales del sitio.

El objetivo general del estudio fue evaluar el crecimiento radial de *P. patula* en dos plantaciones con edad e intensidad de aclareo diferentes, así como su relación con la variación interanual de temperatura y precipitación. Los objetivos específicos fueron a) evaluar el efecto del espacio de crecimiento en el crecimiento radial del árbol; b) evaluar el efecto de la edad de la plantación en la respuesta del arbolado al espacio de crecimiento; y c) estimar la correlación entre el crecimiento radial de los árboles y las condiciones de temperatura y precipitación durante el año de formación del anillo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se hizo en dos plantaciones de *P. patula* en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. La primera se estableció en 1995, a 2 538 m de altitud (17° 22´ 38.3" N y 96° 28´ 43.2" O) y con espaciamiento inicial de 1.5 x 1.5 m (4 444 árboles·ha^{-1}). La segunda se estableció en 2005, a 2 877 m (17° 40´ 17.6" N y 96° 46´ 05.3" O) y con espaciamiento de 2.5 x 2.5 m (1600 árboles·ha^{-1}).

En cada plantación se evaluaron 10 árboles de cada una de tres parcelas de 400 m^2 (20 x 20 m), que incluyeron dos parcelas aclaradas y una sin aclareo. El aclareo de la plantación 1995 se hizo en 2004, 2008 y 2017, de acuerdo con el plan de manejo establecido por el prestador de servicios técnicos forestales en la comunidad. En el tercer aclareo (2017) se removió

Table 1. Mensuration characteristics of *Pinus patula* trees in 13- and 23-year-old plantations.
Cuadro 1. Características dasométricas en árboles de *Pinus patula* en las plantaciones de 13 y 23 años.

Plantation / Plantación	Variable / Característica dasométrica	Plot 1 (slight thinning) / Parcela 1 (aclareo ligero)	Plot 2 (moderate thinning) / Parcela 2 (aclareo moderado)	Plot 3 (no thinning) / Parcela 3 (sin aclareo)
1995 (23 years) / (23 años)	NT (trees·ha^{-1}) / NA (árboles·ha^{-1})	950	825	2 475
	mDBH (cm) / DNP (cm)	24.20	27.20	19.73
	BA (m^2·ha^{-1}) / AB (m^2·ha^{-1})	46.11	58.51	30.98
	VOL (m^3·ha^{-1})	107.81	131.88	68.30
2005 (13 years) / (13 años)	NT (trees·ha^{-1}) / NA (árboles·ha^{-1})	1 175	700	1 550
	mDBH (cm) / DNP (cm)	14.95	16.85	13.65
	BA (m^2·ha^{-1}) / AB (m^2·ha^{-1})	18.41	23.44	15.34
	VOL (m^3·ha^{-1})	42.35	44.50	39.65

NT = number of trees, mDBH = mean diameter at breast height, BA = basal area; VOL = total volume.

NA = número de árboles, DNP = diámetro normal promedio, AB = área basal; VOL = volumen total.

Tree distribution and sampling

A distribution map of trees in each plot was drawn up. Each plot was divided into 10 x 10 m quadrants; subsequently, angles and distances were recorded for each individual, taking as a reference one dominant tree per quadrant. The data were recorded in an Excel 2013 sheet, and imported by the Quantum GIS 2.18 software (QGIS Development Team, 2002) to create the distribution plan.

Based on the spatial distribution of trees per plot, 10 trees representative of the average level of competition within the plots were selected. In order to obtain a greater number of growth rings, the wood sample (chip) from each tree was extracted at 80 cm from the ground. The sample was taken perpendicular to the slope, with a 5 mm diameter Pressler® auger, in the spring of 2018 (the last ring of the sample was formed in 2017). The samples were transported in plastic straws as a means of protection, stored in a cool environment, mounted on wooden bases, and polished with coarse grit sandpaper (60 and 100) and extra-fine grit sandpaper (1200) to see the growth rings in detail.

Measurement of neighboring trees

On the same field sampling date, the four neighboring trees closest to each selected tree (10 trees per plot) were measured to estimate the individual and per-plot competition index. Quadrants were established for each selected tree following the cardinal orientation (N, E, S and W). In each quadrant the nearest tree was identified; diameter at breast height, total height and distance to the selected tree were measured. With these data the competition index (CIi) for each sampled tree was calculated with the following formula (Daniels, Burkhart, & Clason, 1986):

$$CI_i = \sum(DBH_j/d_{ij})$$

where,
DBH_j = diameter at breast height of the j-th neighboring tree
d_{ij} = distance from j-th neighboring tree to the i-th sampled tree.

The CI_i values were used to calculate the average competition index per plot for the 10 sampled trees in each of them.

Sample processing

Wood samples (cores) from each tree were scanned and the images were processed with the winDENDRO™ software (Regent Instruments Inc. 2008). In each identified image, the growth rings were counted,

20 % (parcela 1) y 28 % (parcela 2) de los árboles por hectárea. El aclareo de la plantación 2005 se hizo en 2016, con la remoción de 16 % (parcela 1) y 26 % (parcela 2) de los árboles, de acuerdo con el plan de manejo establecido. La densidad estimada de estas parcelas, antes del aclareo, fue 1400 árboles·ha^{-1} (parcela 1) y 950 árboles·ha^{-1} (parcela 2). En 2018, se hicieron mediciones de diámetro normal y altura total, y se estimó el área basal y volumen total de las parcelas en cada plantación (Cuadro 1).

Distribución y muestreo de árboles

Se elaboró un plano de distribución de los árboles en las parcelas. Cada parcela se dividió en cuadrantes de 10 x 10 m; posteriormente, se registraron ángulos y distancias de cada individuo, tomando de referencia un árbol dominante por cuadrante. Los datos se registraron en una hoja Excel versión 2013 y fueron importados por el *software* Quantum GIS versión 2.18 (QGIS Development Team, 2002) para crear el plano de distribución.

Con base en la distribución espacial de los árboles por parcela, se seleccionaron 10 que fueran representativos del nivel de competencia promedio en ellas. De cada árbol se extrajo la muestra de madera (viruta) a 80 cm del suelo, con el propósito de obtener un mayor número de anillos de crecimiento. La muestra se tomó perpendicular a la pendiente, con un taladro de Pressler® de 5 mm de diámetro, en la primavera de 2018 (el último anillo de la muestra se formó en 2017). Las muestras se transportaron en popotes de plástico como medio de protección, se almacenaron en un ambiente fresco, se montaron en bases de madera y se pulieron con lijas de madera (grano 60 y 100) y lijas de agua (1200), para ver los anillos de crecimiento con detalle.

Medición de árboles vecinos

En la misma fecha del muestreo en campo se midieron los cuatro árboles vecinos más cercanos a cada árbol seleccionado (10 árboles por parcela), para estimar el índice de competencia individual y por parcela. En cada árbol seleccionado se establecieron cuadrantes siguiendo la orientación cardinal (N, E, S y O). En cada cuadrante se identificó el árbol más cercano, se midió el diámetro normal, la altura total y la distancia al árbol seleccionado. Con estos datos se calculó el índice de competencia (IC_i) para cada árbol muestreado con la fórmula siguiente (Daniels, Burkhart, & Clason, 1986):

$$CI_i = \sum(DN_j/d_{ij})$$

donde,
DN_j = diámetro normal del j-ésimo árbol vecino
d_{ij} = distancia del j-ésimo árbol vecino al i-ésimo árbol muestra.

taking as a reference the ring formed in 2017. Once the year of formation of each ring was identified, total ring width (RW, mm) was measured, as well as earlywood width (EWW) and latewood width (LWW). Latewood proportion (LWP) was estimated with the equation:

$$LWP = (LWW \times 100) / RW$$

The annual basal area increment (BAI) was determined with RW. For this, the accumulated growth in diameter and basal area was calculated, and the BAI was obtained by subtracting the value of the previous year.

Statistical analysis

An analysis of variance was carried out with the SAS 9.3 GLM procedure (SAS Institute, 2004), using relative values of the ring characteristics. Relative values were obtained by adjusting the original values, based on the average value of the characteristic in each tree and plot, to reduce the effect of growth rate or size among trees within each plot. The equation used to obtain relative values was:

$$X_{ijr} = (X_{ij}/\overline{X}_j)*\overline{X}$$

where,
X_{ijr} = relative value in the i-th ring of the j-th tree
X_{ij} = absolute value in the i-th ring of the j-th tree
$\overline{X}_j$ = average value of the j-th tree
$\overline{X}$ = average value of plot.

The radial growth of the plantations and its relationship with climatic conditions (temperature and rainfall) in the year of ring formation was compared using the following procedure: first the effect of cambial age on RW and EWW was eliminated using a negative exponential regression model; then, the average value of the variable in the plantation was added to the residuals of this model to return the values to the original scale; and then, with the adjusted values of RW and EWW, the LWW and LWP in each ring were estimated by difference. Finally, with the adjusted values, an analysis of variance was made to evaluate the differences between plantations in the characteristics of rings formed from 2008 to 2017, using the MIXED procedure in SAS (SAS Institute, 2004).

The relationship between growth ring characteristics and temperature and rainfall, during the year of wood formation, was estimated using a correlation analysis between the RW, EWW and LWW variables and the average annual mean, maximum and minimum temperature, and annual rainfall estimated for each plantation site. Climate data were estimated with the "Climate NA v5.00" software model (Wang, Hamman, Spittlehouse, & Carroll, 2016). The 1999-2016 time

Con los valores de IC_i se calculó el índice de competencia promedio por parcela para los 10 árboles muestreados en cada una de ellas.

Procesamiento de muestras

Las muestras de madera (viruta) de cada árbol se escanearon y las imágenes se procesaron con el *software* winDENDRO™ (Regent Instruments Inc., 2008). En cada imagen identificada se contaron los anillos de crecimiento, tomando como referencia el anillo formado en 2017. Una vez identificado el año de formación de cada anillo, se midió la anchura total del anillo (AA, mm), así como la anchura de madera temprana (ATE) y de madera tardía (ATA). La proporción de madera tardía (PT) se estimó con la ecuación:

$$PT = (ATA \times 100) / AA$$

Con la AA se determinó el incremento anual en área basal (IAB). Para ello, se generó el crecimiento acumulado en diámetro y área basal, y por diferencia con el valor del año previo se obtuvo el IAB.

Análisis estadístico

Se hizo un análisis de varianza con el procedimiento GLM de SAS, versión 9.3 (SAS Institute, 2004), utilizando valores relativos de las características de los anillos. Los valores relativos se obtuvieron mediante el ajuste de los valores originales, con base en el valor promedio de la característica en cada árbol y parcela, para reducir el efecto de la velocidad de crecimiento o tamaño entre árboles dentro de cada parcela. La ecuación utilizada para obtener los valores relativos fue:

$$X_{ijr} = (X_{ij}/\overline{X}_j)*\overline{X}$$

donde,
X_{ijr} = valor relativo en el i-ésimo anillo del j-ésimo árbol
X_{ij} = valor absoluto en el i-ésimo anillo del j-ésimo árbol
$\overline{X}_j$ = valor promedio del j-ésimo árbol
$\overline{X}$ = valor promedio de la parcela.

El crecimiento radial de las plantaciones y su relación con las condiciones climáticas (temperatura y precipitación) en los años de formación del anillo se comparó mediante el siguiente procedimiento: primero se eliminó el efecto de la edad cambial sobre AA y ATE con un modelo de regresión exponencial negativo; luego, a los residuales de este modelo se sumó el valor medio de la variable en la plantación, para regresar los valores a la escala original; y después con los valores ajustados de AA y ATE se estimaron, por diferencia, ATA y PT en cada anillo. Finalmente, con los valores ajustados se hizo un análisis de varianza para evaluar las diferencias de las características de los anillos formados en los años 2008 a 2017 entre

series was used in the analysis for the 1995 plantation, and the 2009-2016 time series was used for the 2005 plantation. These series include all the growth rings available in the samples from the two plantations.

Results and discussion

Effect of growing space on ring characteristics

The analysis of variance with relative values allowed detecting more variables with significant differences ($P \leq 0.10$) between the *P. patula* plots. In the 1995 plantation, differences were found in BAI in 2011, in LWW in 2006 and 2008, and in LWP in 2008 and 2017. In contrast, the 2005 plantation did have differences in the five characteristics evaluated and in a greater number of years, as shown in Table 2.

plantaciones, usando el procedimiento MIXED de SAS (SAS Institute, 2004).

La relación de las características de los anillos de crecimiento con la temperatura y precipitación, durante los años de formación de la madera, se estimó con un análisis de correlación entre las variables AA, ATE y ATA con las variables de temperatura media anual, máxima promedio, mínima promedio y precipitación anual estimadas para cada uno de los sitios de plantación. Los datos climáticos se estimaron con el modelo del *software* "Climate NA v5.00" (Wang, Hamman, Spittlehouse, & Carroll, 2016). En el análisis se utilizó la serie de tiempo 1999-2016 para la plantación 1995 y la serie 2009-2016 para la plantación 2005. Estas series incluyen todos los anillos de crecimiento disponibles en las muestras de las dos plantaciones.

Table 2. Analysis of variance (*P* values) of growth ring characteristics in *Pinus patula* trees in three plots (with light, moderate and no thinning) of 13- and 23-year-old plantations.

Cuadro 2. Análisis de varianza (valores de *P*) de las características de los anillos de crecimiento en árboles de *Pinus patula* en tres parcelas (con aclareo ligero, moderado y sin aclareo) de plantaciones de 13 y 23 años.

Year of formation / Año de formación	1995 Plantation (23 years) / Plantación 1995 (23 años)					2005 Plantation (13 years) / Plantación 2005 (13 años)				
	RW / AA	BAI / IAB	EWW / ATE	LWW / ATA	LWP / PT	RW / AA	BAI / IAB	EWW / ATE	LWW / ATA	LWP / PT
1999	0.710	0.704	0.555	0.887	0.871					
2000	0.894	0.819	0.986	0.702	0.746					
2001	0.916	0.711	0.498	0.289	0.235					
2002	0.222	0.952	0.436	0.411	0.883					
2003	0.395	0.996	0.336	0.498	0.284					
2004	0.677	0.885	0.637	0.848	0.881					
2005	0.596	0.938	0.737	0.445	0.713					
2006	0.900	0.920	0.629	0.096*	0.303					
2007	0.813	0.855	0.460	0.656	0.623					
2008	0.856	0.748	0.355	0.031*	0.041*					
2009	0.897	0.731	0.971	0.975	0.871	0.252	0.283	0.306	0.285	0.004*
2010	0.606	0.528	0.492	0.178	0.200	0.060*	0.157	0.082*	0.545	0.955
2011	0.208	0.091*	0.200	0.910	0.592	0.014*	0.030*	0.015*	0.141	0.194
2012	0.670	0.681	0.750	0.413	0.141	0.009*	0.092*	0.383	0.009*	0.126
2013	0.710	0.503	0.696	0.131	0.194	0.001*	0.001*	0.003*	0.715	0.751
2014	0.759	0.814	0.735	0.514	0.351	0.149	0.018*	0.342	0.069*	0.074*
2015	0.864	0.766	0.907	0.267	0.549	0.005*	0.001*	0.008*	0.290	0.750
2016	0.383	0.316	0.380	0.404	0.733	0.479	0.010*	0.665	0.002*	0.003*
2017	0.197	0.192	0.185	0.198	0.046*	0.109	0.001*	0.353	0.029*	0.118

RW = ring width, BAI = basal area increment, EWW = earlywood width, LWW = latewood width, LWP = latewood proportion. *P values ≤ 0.10 indicate significant differences among plots.

AA = anchura de anillo, IAB = incremento en área basal, ATE = anchura de madera temprana, ATA = anchura de madera tardía, PT = proporción de madera tardía. *Los valores $P \leq 0.10$ indican diferencias significativas entre parcelas.

Figure 1 shows that tree ring characteristics had a similar pattern in the plots. In both plantations a juvenile effect was observed with a slight increase in ring width (1a and 1f) in the first years, especially in the young plantation. In the 1995 plantation, all three plots followed the same trend. BAI increased rapidly in the first years; it reached its highest point at eight, and then gradually declined (Figure 1b). The RW and EWW characteristics showed high values, but after three or four years they decreased and in the last years they stabilized at very low values (Figures 1a and 1c). On the other hand, LWW showed wide fluctuations in the first 10 years and then a gradual reduction in latewood formation (Figure 1d). Finally, LWP increased with tree age (Figure 1e) and was the only one with a significant response to the 2017 thinning (Table 2); the highest value was obtained in the plot with the largest growing space (28 %).

In the 2005 plantation, RW and EWW had a similar trend. These characteristics increased in the first four or five years and then gradually decreased (Figure 1f and 1h). BAI increased rapidly in the first seven years and then decreased slightly (Figure 1g). LWW did not show a clear trend (Figure 1i), while LWP showed a gradual increase with age (Figure 1j). Compared to the 1995 plantation, the differences among the plots in the 2005 plantation were larger, in favor of the thinned plots, especially in plot 2 which had the largest growing space (26 %).

According to the literature, initial spacing and pre-thinning are the most effective tools to control tree growth and wood quality in the plantation's early years, as they affect competition among trees and canopy closure (Guerra-Bugueño et al., 2014; Tong & Zhang, 2005). The 1995 plantation was established using narrow spacing (1.5 x 1.5 m), which generated strong competition from the early years and rapid crown recession; this situation cancelled out the expected effect of thinning. Furthermore, although a different number of trees were removed during thinning, the average CI was similar between the plots thinned, due to differences in tree dimensions when thinning was applied ($0.30 \leq CI_{1995} \leq 0.39$ and $0.20 \leq CI_{2005} \leq 0.28$). The combined effect of the narrow initial spacing with crown recession and the small variation in growing space between plots largely explains the limited response of tree radial growth to thinnings made for management purposes.

Latham and Tappeiner (2002) and Auty et al. (2018) indicate that reducing competition for space induces an increase in tree radial growth. In turn, accelerated growth results in a higher number of earlywood cells and less latewood formation (Koga, Zhang, & Bégin, 2002). Hébert et al. (2016) state that fast growing species

Resultados y discusión

Efecto del espacio de crecimiento en las características de los anillos

El análisis de varianza con valores relativos permitió detectar mayor número de variables con diferencias significativas ($P \leq 0.10$) entre las parcelas de *P. patula*. En la plantación 1995 se encontraron diferencias en IAB en 2011, en ATA en 2006 y 2008, y en PT en 2008 y 2017. En cambio, la plantación 2005 sí tuvo diferencias en las cinco características evaluadas y en un mayor número de años, tal como se muestra en el Cuadro 2.

La Figura 1 muestra que las características de los anillos de los árboles tuvieron un patrón similar entre las parcelas. En ambas plantaciones se observó un efecto juvenil con un incremento ligero de anchura de anillo (1a y 1f) en los primeros años, especialmente en la plantación joven. En la plantación 1995, las tres parcelas siguieron el mismo comportamiento. El IAB aumentó rápidamente en los primeros años, alcanzó su punto máximo a los ocho y, posteriormente, declinó de manera gradual (Figura 1b). Las características AA y ATE presentaron valores elevados, pero después de tres o cuatro años disminuyeron y en los últimos años se estabilizaron con valores muy bajos (Figuras 1a y 1c). Por otra parte, la ATA mostró fluctuaciones amplias en los primeros 10 años y después una reducción gradual en la formación de madera tardía (Figura 1d). Finalmente, la PT aumentó con la edad de los árboles (Figura 1e) y fue la única con respuesta significativa al aclareo de 2017 (Cuadro 2); el valor más alto se obtuvo en la parcela con mayor espacio de crecimiento (28 %).

En la plantación 2005, la tendencia de AA y ATE fue similar. Dichas características aumentaron en los primeros cuatro o cinco años y luego disminuyeron gradualmente (Figura 1f y 1h). El IAB aumentó rápidamente en los primeros siete años y luego se redujo ligeramente (Figura 1g). La ATA no mostró una tendencia definida (Figura 1i), mientras que la PT presentó incremento gradual con la edad (Figura 1j). En comparación con la plantación 1995, las diferencias entre las parcelas de la plantación 2005 fueron mayores, a favor de las parcelas aclaradas, especialmente en la parcela 2 con mayor espacio de crecimiento (26 %).

De acuerdo con la literatura, el espaciamiento inicial y el preaclareo son las herramientas más efectivas, para controlar el crecimiento del árbol y la calidad de la madera en los primeros años de la plantación, ya que afectan la competencia entre árboles y el cierre del dosel (Guerra-Bugueño et al., 2014; Tong & Zhang, 2005). La plantación de 1995 se estableció con un espaciamiento reducido (1.5 x 1.5 m), lo que generó

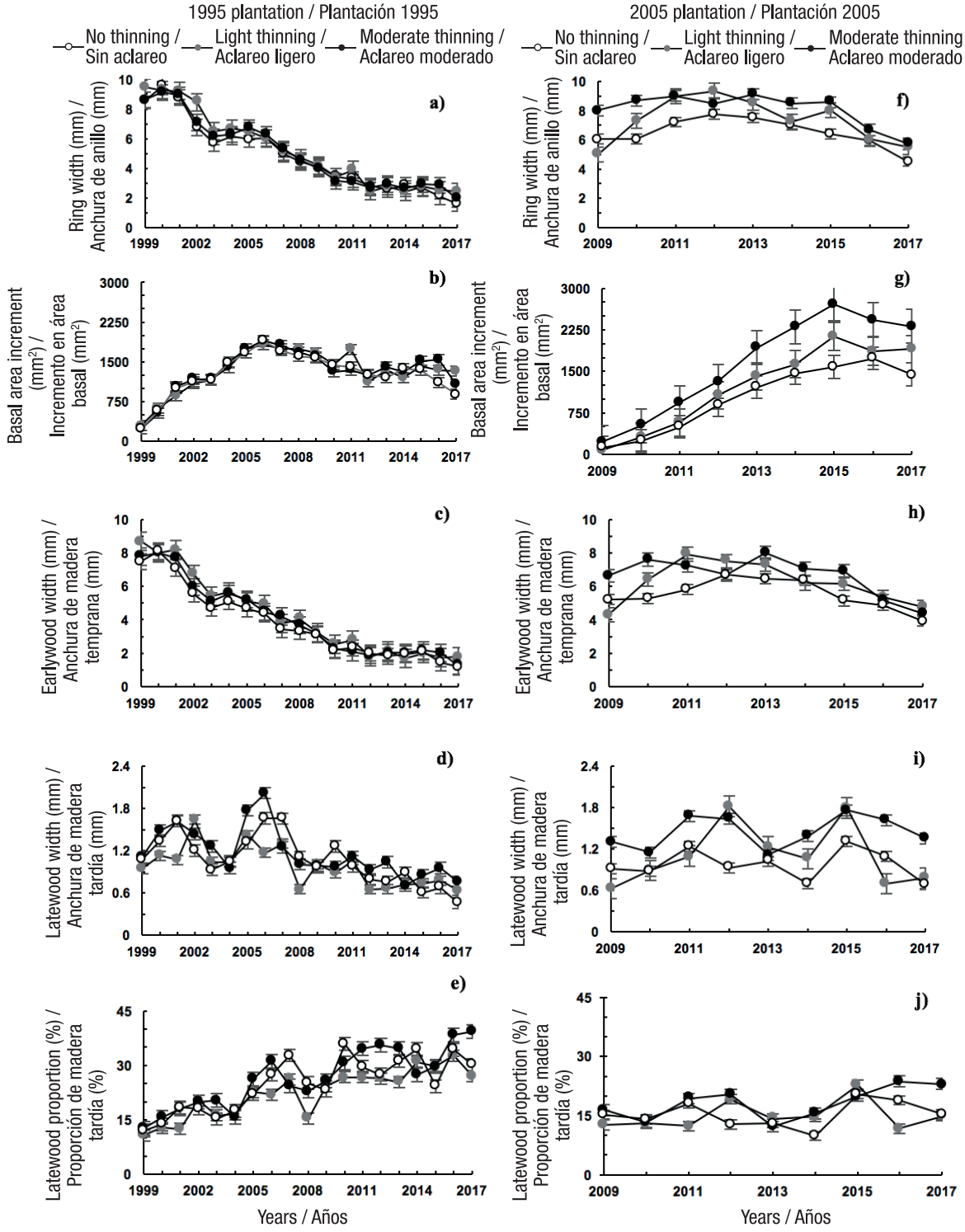

Figure 1. Behavior of average values (± standard error) of growth ring characteristics in trees in thinned and unthinned plots in two *Pinus patula* plantations.

Figura 1. Comportamiento de los valores promedio (± error estándar) de las características de los anillos de crecimiento en los árboles de las parcelas con y sin aclareo en dos plantaciones de *Pinus patula*.

usually produce a higher percentage of earlywood. For that reason, a noteworthy increase in tree diameter growth was expected in the thinned plots; however, in the 1995 plantation, these plots showed very narrow growth rings in the last years, a higher proportion of latewood, and no significant differences ($P > 0.10$) with trees in the unthinned plot, except in the last year. Apparently, although trees in the two thinned plots had larger average spacing, they also had larger diameter and basal area per hectare, and were therefore actually exposed to similar competition (Arenas-Castro, Fernández-Haeger, & Jordano-Barbudo, 2015).

In the 2005 plantation, trees in the thinned plots showed greater growth than in the control plot, starting in the first rings. In particular, trees with more growing space showed higher growth. According to the mensuration data, immediately after the 2016 thinning, plot 2 was left with a density of 700 trees·ha^{-1} with a mean diameter at breast height (mDBH) of 16.85 cm (Table 1), while plots 1 and 3 showed higher density and lower mDBH. Due to the higher mDBH, basal area in plot 2 was 5.03 and 8.1 m^2·ha^{-1} greater than in plots 1 and 3, respectively (Table 1).

Trees acquire the necessary resources to generate photosynthates and use them in various tissues and functions (Binkley, 2004). Akers, Kane, Zhao, Teskey, and Daniels (2013) indicate that light limitations influence tree growth more than soil resource limitations. In this sense, although the three plots were established with the same planting density (1600 trees·ha^{-1}), plot 2 had higher initial mortality. This resulted in greater spacing among the trees that survived in that plot, thereby favoring radial growth.

Differences in tree ring characteristics between plantations

Table 3 shows that the characteristics of the *P. patula* growth rings showed differences ($P \leq 0.10$) between the two plantations during the common period evaluated (2009-2017). The effects were more noticeable in RW and EWW during the years 2009 to 2015, excluding only 2011. In the case of LWW, there were differences in 2010 and 2015, while LWP was different in several years, which included the beginning and end of the common time series.

The behavior of ring characteristics in the two plantations was different during the common period (2009-2017). According to Figure 2, in the first years (2009 and 2010), the trees from the 1995 plantation developed wider growth rings and had more earlywood than those from the 2005 plantation, whereas in the 2012-2015 period the opposite was true. Such behavior is related to the gradual increase in ring width in the young plantation, while in the other one the width

fuerte competencia desde los primeros años y recesión rápida de la copa, situación que anuló el efecto esperado de los aclareos. Además, a pesar de que en los aclareos se eliminó un número distinto de árboles, el IC promedio fue similar entre las parcelas aclaradas, debido a diferencias en las dimensiones de los árboles al momento del aclareo ($0.30 \leq IC_{1995} \leq 0.39$ y $0.20 \leq IC_{2005} \leq 0.28$). El efecto combinado del espaciamiento inicial reducido con la recesión de la copa y la poca variación en el espacio de crecimiento entre las parcelas explican en gran medida la baja respuesta del crecimiento radial de los árboles a los aclareos realizados con fines de manejo.

Latham y Tappeiner (2002) y Auty et al. (2018) indican que la reducción de la competencia por espacio induce aumento en el crecimiento radial del árbol. A su vez, el crecimiento acelerado ocasiona mayor número de células de madera temprana y menor formación de madera tardía (Koga, Zhang, & Bégin, 2002). Por su parte, Hébert et al. (2016) mencionan que las especies de rápido crecimiento suelen producir mayor porcentaje de madera temprana. Por ello se esperaba encontrar un aumento importante en el crecimiento en diámetro de los árboles en las parcelas aclaradas; sin embargo, en la plantación 1995, dichas parcelas mostraron anillos de crecimiento muy estrechos en los últimos años, con mayor proporción de madera tardía y sin diferencias significativas ($P > 0.10$) con los árboles de la parcela sin aclareo, excepto en el último año. Al parecer, aunque los árboles en las dos parcelas aclaradas tenían más espaciamiento promedio, también tenían mayor diámetro y área basal por hectárea, por lo que en realidad estuvieron sometidos a una competencia similar (Arenas-Castro, Fernández-Haeger, & Jordano-Barbudo, 2015).

En la plantación 2005, los árboles en las parcelas aclaradas mostraron mayor crecimiento que en la parcela testigo desde los primeros anillos. En particular, los árboles con más espacio mostraron mayor crecimiento. De acuerdo con los datos dasométricos al momento del aclareo de 2016, la parcela 2 quedó con una densidad de 700 árboles·ha^{-1} con diámetro normal promedio (DNP) de 16.85 cm (Cuadro 1), mientras que las parcelas 1 y 3 presentaron mayor densidad y menor DNP. Debido al mayor DNP, el área basal de la parcela 2 era mayor en 5.03 y 8.1 m^2·ha^{-1} con respecto a las parcelas 1 y 3, respectivamente (Cuadro 1).

Los árboles adquieren los recursos necesarios para generar fotosintatos y usarlos en diversos tejidos y funciones (Binkley, 2004). Akers, Kane, Zhao, Teskey, y Daniels (2013) señalan que la limitación de la luz influye más en el crecimiento de los árboles que la limitación de recursos del suelo. En este sentido, aunque las tres parcelas se establecieron con la misma densidad de plantación (1600 árboles·ha^{-1}), la parcela

Table 3. Analysis of variance (*significant values $P \leq 0.10$) of the characteristics of growth rings adjusted by cambial age, between the two *Pinus patula* plantations.

Cuadro 3. Análisis de varianza (*valores significativos $P \leq 0.10$) de las características de los anillos de crecimiento ajustados por edad cambial entre las dos plantaciones de *Pinus patula*.

Year of formation/ Año de formación	Ring width / Anchura de anillo	Earlywood width / Anchura de madera temprana	Latewood width / Anchura de madera tardía	Latewood proportion / Proporción de madera tardía
2009	<0.001*	<0.001*	0.590	<0.001*
2010	0.013*	0.034*	0.018*	0.107
2011	0.608	0.638	0.911	0.239
2012	0.008*	0.062*	0.107	0.279
2013	0.001*	<0.001*	0.500	0.009*
2014	0.088*	0.012*	0.228	0.002*
2015	0.011*	0.038*	0.034*	0.183
2016	0.501	0.191	0.348	0.091*
2017	0.703	0.364	0.264	0.073*

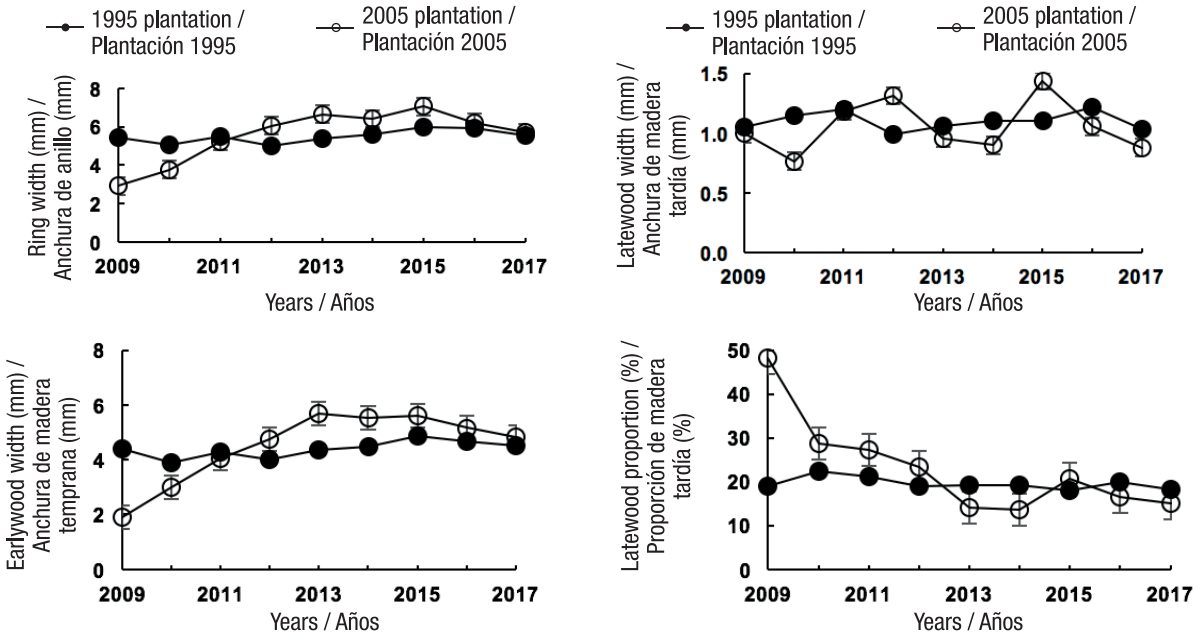

Figure 2. Average growth ring characteristics in different-age *Pinus patula* plantations.

Figura 2. Características promedio de los anillos de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* de diferente edad.

was relatively stable during 2009-2017. It appears that crown recession in the older plantation, due to excessive competition among trees, reduced the response capacity of rings. Although trees with average competition were selected, the level of competition was similar among plots within the same plantation, but not between the two plantations. Competition was more intense in the 1995 plantation, due to differences in initial tree spacing. At the beginning of the comparison period (2009), the 1995 plantation had an average density of 2 358 trees·ha^{-1} and an average basal area of 47.09 m^2·ha^{-1}, while the 2005 plantation had 1 300 trees·ha^{-1} and a basal area of 19.06 m^2·ha^{-1}.

The young plantation showed greater growth from 2012 onwards, which is attributed to spacing between trees and the size and position of live crown (Domínguez-Domínguez, Bravo, & del Río, 2006). Crown length is largely determined by space among trees (Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez, 2009; Gartner, North, Johnson, & Singleton, 2002). On the other hand, it seems that the variation in radial growth is not due to differences in site productivity, since both plantations have a similar site index (SI_{1995} = 33 m and SI_{2005} = 29 m), which was estimated from the equation adjusted by Santiago-García et al. (2017) in *P. patula* stands for the same study area. Although ring width varies with site conditions, pine species maintain a stable proportion of 30 % latewood in cold climates (Düthorn, Schneider, Günther, Gläser, & Esper, 2016); therefore, the value found for both plantations (approximately 20 %) indicates a combined effect of the species' productive potential and favorable environmental conditions. Pompa-García and Camarero-Martínez (2015) reported a similar proportion of latewood (18 %) in *Pinus cooperi* Blanco in productive sites.

The variation observed between growth ring characteristics in both plantations is attributed to the environmental conditions in which trees grow (Schimleck et al., 2018). According to Baldwin et al. (2000), as initial spacing increases, crown diameter and length also increase in trees. This favors the formation of wider rings and more earlywood. Rodríguez-Ortíz (2010) recommends an initial spacing of 2.40 to 2.75 m for *P. patula* because it is a species sensitive to competition in its early years.

Relationship between growth ring characteristics and climatic conditions

According to Table 4, ring characteristics (RW, EWW, and LWW) in the 1995 plantation showed a significant ($P < 0.10$) and positive correlation only with average minimum temperature (T_{AMI}). On the other hand, in the 2005 plantation only the LWW showed a significant correlation, which was positive with average annual temperature and negative with annual rainfall.

2 tuvo más mortalidad inicial. Esto ocasionó mayor espaciamiento entre los árboles que sobrevivieron en esa parcela, favoreciendo el crecimiento radial.

Diferencias en las características de los anillos de los árboles entre plantaciones

El Cuadro 3 muestra que las características de los anillos de crecimiento de *P. patula* presentaron diferencias ($P \leq 0.10$) entre las dos plantaciones durante el periodo evaluado en común (2009-2017). Los efectos fueron más notorios en AA y ATE durante los años 2009 a 2015, excluyendo solo el 2011. En el caso de la ATA hubo diferencias en 2010 y 2015, mientras que la PT fue diferente en varios años, que incluyeron el inicio y el final de la serie de tiempo en común.

El comportamiento de las características de los anillos en las dos plantaciones fue diferente durante el periodo en común (2009-2017). De acuerdo con la Figura 2, en los primeros años (2009 y 2010), los árboles de la plantación 1995 desarrollaron anillos de crecimiento más anchos y con mayor cantidad de madera temprana que los de la plantación 2005, mientras que en el periodo 2012-2015 sucedió lo opuesto. Tal comportamiento se relaciona con el aumento gradual en la anchura de los anillos en la plantación joven, mientras que en la otra plantación, la anchura fue relativamente estable durante 2009-2017. Al parecer, la recesión de la copa en la plantación de mayor edad, debido a la competencia excesiva entre árboles, redujo la capacidad de respuesta de los anillos. Aunque se seleccionaron los árboles con competencia promedio, el nivel de competencia fue similar entre las parcelas de una misma plantación, pero no entre las dos plantaciones. La competencia fue más intensa en la plantación 1995, debido a las diferencias en el espaciamiento inicial del arbolado. Al inicio del periodo de comparación (2009), la plantación 1995 tenía una densidad promedio de 2 358 árboles·ha^{-1} con área basal promedio de 47.09 m^2·ha^{-1}, mientras que la plantación 2005 tenía 1 300 árboles·ha^{-1} con área basal de 19.06 m^2·ha^{-1}.

La plantación joven presentó mayor crecimiento a partir del 2012, lo cual se atribuye al espaciamiento entre los árboles y al tamaño y posición de la copa viva (Domínguez-Domínguez, Bravo, & del Río, 2006). La longitud de la copa está determinada en gran medida por el espacio entre los árboles (Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez, 2009; Gartner, North, Johnson, & Singleton, 2002). Por otro lado, al parecer, la variación en el crecimiento radial no se debe a las diferencias en la productividad del sitio, ya que las dos plantaciones tienen índice parecido (IS_{1995} = 33 m e IS_{2005} = 29 m), estimado a partir de la ecuación ajustada por Santiago-García et al. (2017) en rodales de *P. patula* para la misma zona de estudio. Aunque la anchura de anillo

Table 4. Pearson's correlation coefficients between growth ring characteristics and climatic conditions in two *Pinus patula* plantations.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre las características de los anillos de crecimiento y las condiciones climáticas en dos plantaciones de *Pinus patula*.

Variables	1995 Plantation / Plantación 1995				2005 Plantation / Plantación 2005			
	T_{AA}/T_{MA}	T_{AMA}/T_{MAP}	T_{AMI}/T_{MIP}	R_A/P_A	T_{AA}/T_{MA}	T_{AMA}/T_{MAP}	T_{AMI}/T_{MIP}	R_A/P_A
RW / AA	0.054	0.239	0.506*	-0.295	0.156	0.266	0.120	-0.084
EWW / ATE	0.037	0.343	0.446*	-0.248	0.054	0.190	0.042	0.009
LWW / ATA	0.063	-0.094	0.398*	-0.257	0.698*	0.581	0.534	-0.619*

*Significant correlation coefficients $P \leq 0.10$ ($n_{1995} = 18$; $n_{2005} = 8$). T_{AA} = average annual temperature; T_{AMA} = average maximum temperature; T_{AMI} = average minimum temperature; R_A = annual rainfall; RW = ring width; EWW = earlywood width; LWW = latewood width.

*Coeficientes de correlación significativos $P \leq 0.10$ ($n_{1995} = 18$; $n_{2005} = 8$). T_{MA} = temperatura media anual; T_{MAP} = temperatura máxima promedio; T_{MIP} = temperatura mínima promedio; P_A = precipitación anual; AA = anchura de anillo; ATE = anchura de madera temprana; ATA = anchura de madera tardía.

The positive correlations of RW, EWW and LWW with T_{AMI} in the 1995 plantation (Figures 3a, 3b and 3c) indicate that the increase in minimum temperature induces an increase in radial growth. In the 2005 plantation, this positive relationship between temperature and radial growth was only observed for LWW (Figure 3d); in contrast, the correlation between LWW and annual rainfall was negative, which indicates that in the wettest years there was less latewood formation (Figure 3e).

Temperature and rainfall are important elements in the dynamics of radial growth (Chacón-de la Cruz & Pompa-García, 2015). Consequently, a positive correlation between environmental conditions and radial growth was expected for both plantations. Growth ring characteristics in the 1995 plantation were positively associated with average minimum temperature. These results coincide with the study on wood formation carried out in *Juniperus przewalskii* Kom. (Zhang et al., 2018), as well as in early and latewood width in *P. cooperi* (Pompa-García & Camarero-Martínez, 2015). On the other hand, the negative relationship between latewood width and annual rainfall in the 2005 plantation was unexpected, as studies carried out on other species have generally indicated a positive relationship. For example, Olivar et al. (2013) indicate a positive relationship between radial growth in *P. halepensis* and rainfall, and attribute the development of latewood to the winter rainfall effect. Lebourgeois (2000) also found a positive relationship (r = 0.46) between latewood width and mean monthly rainfall in *Pinus nigra* Arn. However, due to the dynamics of cambial activity during wood formation, the relationship of growth and climatic conditions is very complex and varied (Żywiec et al., 2017).

Temperature and rainfall affect the speed and duration of cambial activity, as well as the transition from varía con las condiciones del sitio, las especies de pino mantienen una proporción estable de 30 % de madera tardía en climas fríos (Düthorn, Schneider, Günther, Gläser, & Esper, 2016); por tanto, el valor encontrado para ambas plantaciones (aproximadamente 20 %) indica un efecto combinado del potencial productivo de la especie y de las condiciones ambientales favorables. Pompa-García y Camarero-Martínez (2015) reportaron una proporción similar de madera tardía (18 %) en *Pinus cooperi* Blanco en sitios productivos.

La variación observada entre las características de los anillos de crecimiento en ambas plantaciones se atribuye a las condiciones ambientales en las que crecen los árboles (Schimleck et al., 2018). De acuerdo con Baldwin et al. (2000), a mayor espaciamiento inicial, los árboles desarrollan mayor diámetro y longitud de copa. Esto favorece la formación de anillos más amplios y más madera temprana. Rodríguez-Ortíz (2010) recomienda un espaciamiento inicial de 2.40 a 2.75 m para *P. patula,* debido a que es una especie sensible a la competencia en sus primeros años de vida.

Relación de las características de los anillos de crecimiento con las condiciones climáticas

De acuerdo con el Cuadro 4, las características de los anillos (AA, ATE y ATA) en la plantación 1995 mostraron correlación significativa ($P < 0.10$) y positiva únicamente con la temperatura mínima promedio (T_{MIP}). En cambio, en la plantación 2005 solo la ATA mostró correlación significativa, la cual fue positiva con la temperatura media anual y negativa con la precipitación anual.

Las correlaciones positivas de AA, ATE y ATA con T_{MIP} en la plantación 1995 (Figuras 3a, 3b y 3c) indican que el aumento en la temperatura mínima induce un aumento en el crecimiento radial. En la plantación 2005, esta relación positiva entre temperatura y crecimiento

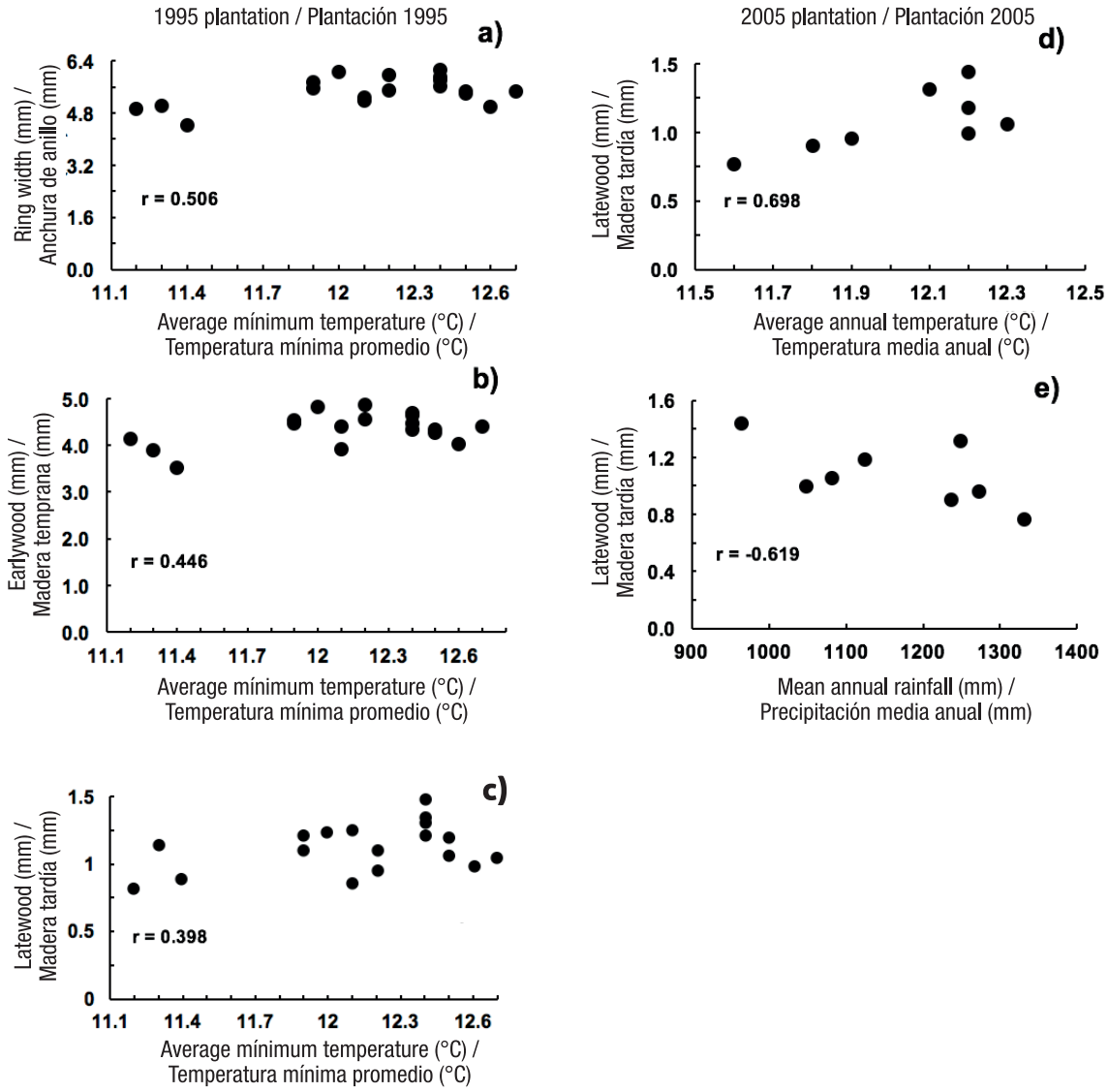

Figure 3. Pearson's correlation of *Pinus patula* growth ring characteristics with environmental conditions. a, b and c: 1995 plantation (n = 18); d and e: 2005 plantation (n = 8).

Figura 3. Correlación de Pearson de las características de los anillos de crecimiento de *Pinus patula* con las condiciones ambientales. a, b y c: plantación 1995 (n = 18); d y e: plantación 2005 (n = 8).

early to latewood in woody species (Rossi, Morin, & Deslauriers, 2012). For example, greater rainfall in the middle of the growth period may promote increased foliage and cambium activity, which prolongs the formation of earlywood and delays the formation of latewood. It has been demonstrated that the transition from early to latewood is associated with the cessation of apical growth (Larson, 1969) and that earlywood formation promotes high hydraulic conductivity (Cruickshank & Filipescu, 2017). In contrast, lower rainfall in the middle of the growth period may result in a faster transition to latewood formation, as part of the response to water stress and to reduce hydraulic vulnerability (Abe, Nakai, Utsumi, & Kagawa, 2003; Domec & Gartner, 2002; Wilkinson, Ogée, Domec, Rayment, & Wingate, 2015).

radial solo se observó para ATA (Figura 3d); en cambio, la correlación entre ATA y la precipitación anual fue negativa, la cual indica que en los años más húmedos hubo menor formación de madera tardía (Figura 3e).

La temperatura y precipitación son elementos importantes en la dinámica del crecimiento radial (Chacón-de la Cruz & Pompa-García, 2015). Por ello, se esperaba una correlación positiva entre las condiciones ambientales y el crecimiento radial para ambas plantaciones. Las características de los anillos de crecimiento en la plantación 1995 se asociaron de manera positiva con la temperatura mínima promedio. Estos resultados coinciden con el estudio de formación de madera realizado en *Juniperus*

Conclusions

The response of *Pinus patula* to growing space was different in the two plantations. In the older plantation (23 years), thinnings had a lesser impact on stem radial growth and growth ring characteristics because trees, due to their larger size in the thinned plots, had competition levels similar to the control plot. In the younger plantation (13 years), the wider growing space in the thinned plots stimulated radial growth, resulting in wider rings and a greater amount of earlywood. Therefore, it is important to take into account tree age and size, as well as the level of competition between them, when defining the appropriate thinning intensity. On the other hand, temperature and rainfall during the period of wood formation influenced annual ring characteristics. Temperature had a positive effect on ring width and its components (early and latewood), which is an important issue in the context of climate change.

End of English version

References / Referencias

Abe, H., Nakai, T., Utsumi, Y., & Kagawa, A. (2003). Temporal water deficit and wood formation in *Cryptomeria japonica*. *Tree Physiology*, *23*(12), 859–863. doi: 10.1093/treephys/23.12.859

Akers, M. K., Kane, M., Zhao, D., Teskey, R. O., & Daniels, R. F. (2013). Effects of planting density and cultural intensity on stand and crown attributes of mid-rotation loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management*, *310*, 468–475. doi: 10.1016/j.foreco.2013.07.062

Álvarez-Taboada, M. F., Barrio-Anta, M., Gorgoso-Varela, J., & Álvarez-González, J. G. (2003). Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. *Investigación Agraria: Sistema Recursos Forestales*, *12*(2), 25–35. Retrieved from https://recyt.fecyt.es/index.php/IA/article/view/2493/1874

Arenas-Castro, S., Fernández-Haeger, J., & Jordano-Barbudo, D. (2015). Estructura de edades, tamaños y crecimiento en una población local de piruétano (Córdoba, España). *Ecosistemas*, *24*(2), 7–14. Retrieved from https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/1053

Auty, D., Moore, J., Achim, A., Lyon, A., Mochan, S., & Gardiner, B. (2018). Effects of early respacing on the density and microfibril angle of sitka spruce wood. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, *91(3)*, 307–319. doi:10.1093/forestry/cpx004

Baldwin, V. C., Peterson, K. D., Clark III, A., Ferguson, R. B., Strub, M. R., & Bower, D. R. (2000). The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old loblolly pine. *Forest*

przewalskii Kom. (Zhang et al., 2018), así como en la anchura de madera temprana y tardía en *P. cooperi* (Pompa-García & Camarero-Martínez, 2015). Por otra parte, la relación negativa entre la anchura de madera tardía y la precipitación anual en la plantación 2005 fue inesperada, ya que los estudios realizados en otras especies, generalmente, han indicado una relación positiva. Por ejemplo, Olivar et al. (2013) señalan una relación positiva entre el crecimiento radial en *P. halepensis* con la precipitación, y atribuyen el desarrollo de la madera tardía al efecto de la lluvia invernal. Lebourgeois (2000) también encontró una relación positiva (r = 0.46) entre la anchura de madera tardía y la precipitación media mensual en *Pinus nigra* Arn. No obstante, debido a la dinámica de la actividad cambial durante la formación de la madera, la relación del crecimiento con las condiciones climáticas es muy compleja y variada (Żywiec et al., 2017).

La temperatura y precipitación afectan la velocidad y duración de la actividad cambial, así como la transición de madera temprana a madera tardía en las especies leñosas (Rossi, Morin, & Deslauriers, 2012). Por ejemplo, es posible que una mayor precipitación a mediados del periodo de crecimiento promueva mayor actividad del follaje y del cámbium, lo que prolonga la formación de madera temprana y retrasa la formación de madera tardía. Se ha demostrado que la transición de madera temprana a tardía está asociada con el cese del crecimiento apical (Larson, 1969) y que la formación de madera temprana favorece una alta conductividad hidráulica (Cruickshank & Filipescu, 2017). En cambio, una menor precipitación a mediados del periodo de crecimiento puede ocasionar una transición más rápida a la formación de madera tardía, como parte de la respuesta al estrés hídrico y para reducir la vulnerabilidad hidráulica (Abe, Nakai, Utsumi, & Kagawa, 2003; Domec & Gartner, 2002; Wilkinson, Ogée, Domec, Rayment, & Wingate, 2015).

Conclusiones

La respuesta de *Pinus patula* al espacio de crecimiento fue diferente en las plantaciones. En la plantación de mayor edad (23 años), los aclareos tuvieron un impacto reducido sobre el crecimiento radial del fuste y las características de los anillos de crecimiento, debido a que los árboles, por su mayor tamaño en las parcelas aclaradas, tuvieron niveles similares de competencia que en la parcela testigo. En la plantación de menor edad (13 años), el mayor espacio de crecimiento en las parcelas aclaradas estimuló el crecimiento radial, con mayor amplitud de anillos y madera temprana. Por lo anterior, es importante tomar en cuenta la edad, el tamaño de los árboles y el nivel de competencia entre ellos para definir la intensidad del aclareo. Por otro lado, la temperatura y la precipitación influyeron en

Ecology and Management, *137*(1-3), 91–102. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00340-0

Binkley, D. (2004). A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. *Forest Ecology and Management*, *190*(2-3), 265–271. doi: 10.1016/j.foreco.2003.10.018

Castelán-Lorenzo, M., & Arteaga-Martínez, B. (2009). Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método de árboles padres. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *15*(1), 49–57. Retrieved from https://www.chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?seccion=numero&id_revista_numero=39

Chacón-de la Cruz, J. E., & Pompa-García, M. (2015). Response of tree radial growth to evaporation, as indicated by earlywood and latewood. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *21*(1), 57–65. doi: 10.5154/r.rchscfa.2014.10.050

Cruickshank, M. G., & Filipescu, C. N. (2017). The interactive effect of root disease and climate on wood properties in halfsibling Douglas-fir families. *Forest Ecology and Management*, *392*, 58–67. doi: 10.1016/j.foreco.2017.03.002

Daniels, R. F., Burkhart, H. E., & Clason, T. R. (1986). A comparison of competition measures for predicting growth of Ioblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research, 16*(6), 1230–1237. doi: 10.1139/x86-218

Domec, J. C., & Gartner, B. L. (2002). How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood? *Journal of Experimental Botany*, *53*(379), 2369–2379. doi: 10.1093/jxb/erf100

Domínguez-Domínguez, M., Bravo, F., & del Río, M. (2006). Modelo del tamaño de copa de *Pinus sylvestris* L. en bosque del centro de España. *Interciencia*, *31*(3), 168–175. Retrieved from http://www.redalyc.org/pdf/339/33911403.pdf

Düthorn, E., Schneider, L., Günther, B., Gläser, S., & Esper, J. (2016). Ecological and climatological signals in tree-ring width and density chronologies along a latitudinal boreal transect. *Scandinavian Journal of Forest Research, 31*(8), 750–757. Retrieved from https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02827581.2016.1181201

García-Suárez, A. M., Butler, C. J., & Baillie, M. G. L. (2009). Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: A multi-species approach. *Dendrochronologia*, *27*(3), 183–198. doi: 10.1016/j.dendro.2009.05.003

Gartner, B. L., North, E. M., Johnson, G. R., & Singleton, R. (2002). Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, *32*(3), 439–447. doi: 10.1139/x01-218

Guerra-Bugueño, E., Célis-Mosqueira, F., & Moreno-García, N. (2014). Efecto de la densidad de plantación en la rentabilidad de plantaciones de *Eucalyptus globulus*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *20*(1), 21–31. doi: 10.5154/r.rchscfa.2012.08.051

Haghshenas, M., Mohadjer, M. R. M., Attarod, P., Pourtahmasi, K., Feldhaus, J., & Sadeghi, S. M. M. (2016). Climate effect on tree-ring widths of *Fagus orientalis* in the Caspian forests, northern Iran. *Forest Science and Technology*, *12*(4), 176–182. doi: 10.1080/21580103.2016.1144542

Hébert, F., Krause, C., Pierre-Yves, P., Achim, A., Prégent, G., & Ménétrier, J. (2016). Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-year-old *Pinus banksiana* plantation in the boreal forest of Quebec. *Forests*, *7*(11), 1–16. doi: 10.3390/f7110276

Hernández, L., & Castellanos, H. (2006). Crecimiento diamétrico arbóreo en bosques de Sierra de Lema, Guayana venezolana: Primeras evaluaciones. *Interciencia*, *31*(11), 779–786. Retrieved from http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33912205

Koga, S., Zhang, S. Y., & Bégin, J. (2002). Effects of precommercial thinning on annual radial growth and wood density in balsam fir (*Abies balsamea*). *Wood and Fiber Science*, *34*(4), 625–642. Retrieved from https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/viewFile/329/329

Larson, P. R. (1969). Wood formation and the concept of wood quality. Retrieved from https://www.fs.fed.us/nrs/pubs/other/1969/nc_1969_larson_001.pdf

Latham, P., & Tappeiner, J. (2002). Response of old-growth conifers to reduction in stand density in western Oregon forests. *Tree Physiology*, *22*(2-3), 137–146. doi: 10.1093/treephys/22.2-3.137

Lebourgeois, F. (2000). Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Annals of Forest Science*, *57*(2), 155–164. doi: 10.1051/forest:2000166

Macdonald, E., & Hubert, J. (2002). A review of the effects of silviculture on wood quality. *Forestry*, *75*(2), 107–138. Retrieved from https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/undergraduateresearch/52966/items/1.0103111

McKeand, S., Mullin, T., Byram, T., & White, T. (2003). Deployment of genetically improved loblolly and slash pines in the south. *Journal of Forestry*, *101*(3), 32–37. Retrieved from https://academic.oup.com/jof/article/101/3/32/4608659

Olivar, J., Bogino, S., Spiecker, H., & Bravo, F. (2012). Climate impact on growth dynamic and intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes. *Dendrochronologia*, *30*(1), 35–47. doi: 10.1016/j.dendro.2011.06.001

Olivar, J., Rathgeber, C. B. K., Ordoñez, C., & Bravo, F. (2013). Influencia del clima en la densidad de la madera de pinos mediterráneos (*Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*).

las características de los anillos durante el periodo de formación de la madera. La temperatura tuvo efecto positivo en la anchura del anillo y de sus componentes (madera temprana y tardía), un aspecto importante en el contexto del cambio climático.

Fin de la versión en español

In Sociedad Española de Ciencias Forestales (Ed.), *6° Congreso Forestal Español* (pp. 1–13). España: Author. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/262270215_Influencia_del_clima_en_la_densidad_de_la_madera_de_pinos_mediterraneos_Pinus_halepensis_y_Pinus_pinaster

Pompa-García, M., & Camarero-Martínez, J. J. (2015). Potencial dendroclimático de la madera temprana y tardía de *Pinus cooperi* Blanco. *Agrociencia*, *49*(2), 177–187. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v49n2/v49n2a6.pdf

QGIS Development Team. (2002). QGIS Geographic Information System. Open source geospatial foundation project. Retrieved from https://docs.qgis.org/3.4/es/docs/user_manual/

Regent Instruments Inc. (2008). WinDENDRO™ An image analysis system for tree ring analysis. Quebec, Canadá: Author.

Rodríguez-Ortíz, G. (2010). Efecto de aclareos en el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schl. *et* Cham. en Ixtlán, Oaxaca. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo. Texcoco, Estado de México, México. Retrieved from https://nanopdf.com/download/efecto-de-aclareos-en-el-crecimiento-de_pdf

Rossi, S., Morin, H., & Deslauriers, A. (2012). Causes and correlations in cambium phenology: towards an integrated framework of xylogenesis. *Journal of Experimental Botany*, *63*(5), 2117–2126. doi: 10.1093/jxb/err423

Salazar, G. J. G., Vargas, H. J. J., Jasso, M. J., Molina, G. J. D., Ramírez, H. C., & López, U. J. (1999). Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques*, *5*(2), 19–34. doi: 10.21829/myb.1999.521345

Santiago-García, W., Pérez-López, E., Quiñonez-Barraza, G., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, E., Ruiz-Aquino, F., & Tamarit-Urias, J. C. (2017). A dynamic system of growth and yield equations for *Pinus patula*. *Forests*, *8*(12), 1–13. doi: 10.3390/f8120465

SAS Institute Inc. (2004). The SAS system for windows. Versión 9.4. Cary, NC, USA: Author.

Schimleck, L., Antony, F., Dahlen, J., & Moore, J. (2018). Wood and fiber quality of plantation-grown conifers: A summary of research with an emphasis on loblolly and radiata pine. *Forests*, *9*(6), 1–16. doi: 10.3390/f9060298

Tong, Q. J., & Zhang, S. Y. (2005). Impact of initial spacing and precommercial thinning on jack pine tree growth and stem quality. *Forestry Chronicle*, *81*(3), 418–428. doi: 10.5558/tfc81418-3

Wang, T., Hamann A., Spittlehouse, D., & Carroll, C. (2016). Locally downscaled and spatially customizable climate data for historical and future periods for North America. *PLoS ONE, 11*(6): e0156720. doi: 10.1371/journal.pone.0156720

Wilkinson, S., Ogée, J., Domec, J. C., Rayment, M., & Wingate, L. (2015). Biophysical modelling of intra-ring variations in tracheid features and wood density of *Pinus pinaster* trees exposed to seasonal droughts. *Tree Physiology*, *35*(3), 305–318. doi: 10.1093/treephys/tpv010

Zhang, J., Gou, X., Pederson, N., Zhang, F., Niu, H., Zhao, S., & Wang, F. (2018). Cambial phenology in *Juniperus przewalskii* along different altitudinal gradients in a cold and arid region. *Tree Physiology*, *38*(6), 840–852. doi: 10.1093/treephys/tpx160

Zhu, J. Y., Scott, C. T., Scallon, K. L., & Myers, G. C. (2007). Effects of plantation density on wood density and anatomical properties of red pine (*Pinus resinosa* Ait.). *Wood and Fiber Science*, *39*(3), 502–512. Retrieved from https://www.fs.usda.gov/ treesearch/pubs/29256

Żywiec, M., Muter, E., Zielonka, T., Delibes, M., Calvo, G., & Fedriani, J. M. (2017). Long-term effect of temperature and precipitation on radial growth in a threatened thermo-Mediterranean tree population. *Trees - Structure and Function*, *31*(2), 491–501. doi: 10.1007/s00468-016-1472-8