



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

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

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**CRECIMIENTO RADIAL EN *Pinus patula*
Y SU RELACIÓN CON EL NIVEL DE
COMPETENCIA Y FACTORES
CLIMÁTICOS**

LUZ MARÍA REYES CORTÉS

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, **Luz María Reyes Cortés**, alumna 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. J. Jesús Vargas Hernández**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis “**Crecimiento radial en *Pinus patula* y su relación con el nivel de competencia y factores climáticos**”, 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, Texcoco, Estado de México, a 21 de noviembre de 2018



Firma del
Alumno (a)



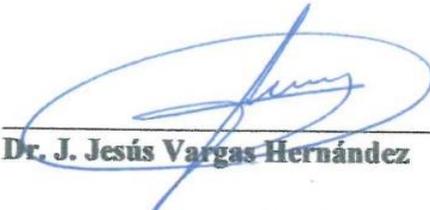
Dr. J. Jesús Vargas Hernández
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: “**Crecimiento radial de *Pinus patula* y su relación con el nivel de competencia y factores climáticos**” realizada por la alumna: **Luz María Reyes Cortés** 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
EN CIENCIAS FORESTALES

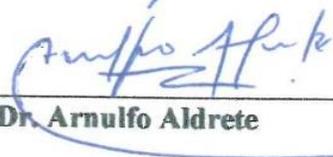
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



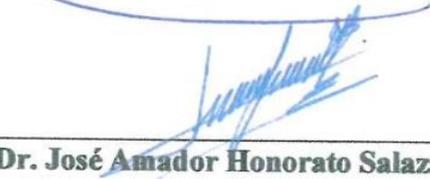
Dr. J. Jesús Vargas Hernández

ASESOR



Dr. Arnulfo Aldrete

ASESOR



Dr. José Amador Honorato Salazar

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2018

Crecimiento radial de *Pinus patula* y su relación con el nivel de competencia y factores climáticos

Luz María Reyes Cortés, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar el efecto del nivel de competencia sobre el crecimiento radial en dos plantaciones *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. de diferentes edades y aclareadas a diferentes intensidades en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Se analizaron las características de los anillos de crecimiento en los árboles en relación con el espaciamiento, el índice de competencia y las condiciones climáticas en seis parcelas de 20 x 20 m, en las plantaciones establecidas en 1995 y 2005. En 2017 se seleccionaron y derribaron 10 árboles en dos parcelas aclareadas de la plantación de 1995, y se analizaron los anillos de crecimiento en tres secciones transversales (rodajas) de cada árbol. En 2018 se extrajeron virutas de madera adicionales en 10 árboles por parcela de las seis parcelas en estudio (tres por plantación). Los aclareos aplicados en 2004 y 2008 en la plantación de 1995 causaron un impacto reducido sobre los anillos anuales y sus características en la sección basal; el efecto sobre los anillos sólo se observó en el año 2005, con efectos similares en el incremento en área basal y en la anchura de madera temprana. En la sección intermedia y superior del fuste, la competencia causó una reducción gradual en la conicidad del árbol. Los árboles en las parcelas aclareadas de la plantación 1995 siguieron la misma tendencia que los de la parcela control, mientras que en la plantación 2005 los árboles de la parcela con mayor espaciamiento promedio mostraron anillos de crecimiento más amplios. La anchura de anillo, madera temprana y madera tardía, mostraron una correlación positiva con la temperatura mínima anual promedio en la plantación 1995 y la madera tardía se relacionó de manera positiva con la temperatura promedio anual y de manera negativa con la precipitación anual en la plantación 2005.

Palabras clave: Características de anillos de crecimiento, perfil de fuste, coeficiente de forma, espacio de crecimiento, temperatura, precipitación.

Radial growth of *Pinus patula* and its relationship with level of competition and climatic factors

Luz María Reyes Cortés, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

This study was undertaken in order to evaluate competition effects on radial growth in two *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. plantations of different ages and different thinning levels, established at the community of Ixtlan de Juarez, Oaxaca. The annual growth ring traits of trees were analyzed in relation with spacing, competition index and climatic conditions in six 20 x 20 m plots, in plantations established in 1995 and 2005. In 2017, 10 trees were selected and cut in two thinning plots of the 1995 plantation, and growth rings were analyzed in three radial sections (slices) from each tree. In 2018, additional wood cores were extracted in 10 trees per plot of the six plots under study (three per plantation). Thinnings applied in 2004 and 2008 had a minimal impact on growth ring traits in the basal section; the effect was noted only in the width of the 2005 growth ring, with similar effects in basal area increment and earlywood width. At the medium and upper stem sections, the competition caused a gradual reduction in tree taper. Trees in thinned plots in the 1995 plantation followed the same trend as trees in the control plot, whereas in the 2005 plantation trees in the most widely-spaced plot showed wider growth rings than in the least-spaced plot. Annual ring, earlywood and latewood widths, showed a positive correlation with average annual minimum temperature in the 1995 plantations whereas latewood width was positively correlated with mean annual temperature and negatively correlated with annual precipitation in the 2005 plantation.

Keys words: growth rings traits, stem taper, stem form coefficient, growing space, temperature, precipitation.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados por la oportunidad de formar parte de su comunidad académica y en particular al programa forestal por su apoyo en mi formación profesional.

A la comunidad de Ixtlán de Juárez por la facilidad brindada en realizar este trabajo de investigación, a servicios técnicos M.C. Elías Santiago García y al Dr. Wenceslao Santiago García por su valioso apoyo en la recopilación de la información.

Al consejo particular: Dr. J. Jesús Vargas Hernández, Dr. Arnulfo Aldrete y Dr. José Amador Honorato Salazar por su disposición, paciencia y apoyo, en especial por compartir sus conocimientos para la elaboración del presente proyecto. Al Dr. Javier López Upton por su gran apoyo y tiempo en la revisión del documento final.

Al Dr. Gerardo Rodríguez Ortíz por su apoyo en proporcionar información sobre el manejo de las plantaciones.

A Rodrigo Hernández Aguilar y David Aguilar Hernández por su valioso apoyo en la preparación de las muestras. A Lorenzo González Hernández por su colaboración en la toma de datos en campo y a Carlos López Jiménez por su ayuda en la extracción de las muestras en campo.

A mis compañeros del ColPos “**Generación otoño 2016**”, por la oportunidad de conocerlos y convivir con ellos y a todos aquellos que de forma directa o indirecta me ayudaron a culminar esta etapa.

Gracias

DEDICATORIA

Familia: padres y hermanos.
Agradezco infinitamente su apoyo, amor y confianza
desde el comienzo de este caminar,
hasta este honorable momento de mi vida.
Eternamente agradecida por tenerlos.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
AGRADECIMIENTOS	vi
DEDICATORIA	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE CUADROS.....	xi
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I. CRECIMIENTO RADIAL Y COEFICIENTE DE FORMA DEL FUSTE EN PLANTACIONES ACLAREADAS DE <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. et Cham.....	3
1.1 RESUMEN	3
1.2 ABSTRACT.....	4
1.3 INTRODUCCIÓN	5
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS	7
1.4.1 Área de estudio	7
1.4.2 Muestreo en campo	7
1.4.3 Medición de árboles vecinos	9
1.4.4 Procesamiento de muestras en laboratorio.....	9
1.4.5 Análisis estadísticos de los datos	10
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
1.5.1 Efecto del aclareo en las características de los anillos de crecimiento en la base del árbol.....	11
1.5.2 Efecto del aclareo en las características de los anillos a diferentes alturas del fuste.....	14
1.5.3 Efecto del aclareo en el coeficiente de forma del fuste	18
1.6 CONCLUSIÓN.....	21
CAPÍTULO II. CRECIMIENTO RADIAL EN <i>Pinus patula</i> Y SU RELACIÓN CON EL ESPACIO DE CRECIMIENTO Y LOS FACTORES CLIMÁTICOS	22
2.1 RESUMEN	22
2.2 ABSTRACT.....	23
2.3 INTRODUCCIÓN	24
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	26

2.4.1 Área de estudio	26
2.4.2 Muestreo de los árboles	27
2.4.3 Medición de árboles vecinos.....	28
2.4.4 Procesamiento de muestras en laboratorio.....	29
2.4.5 Análisis estadístico de los datos.....	29
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
2.5.1 Efecto del espacio de crecimiento en las características de los anillos.....	31
2.5.2 Diferencias en las características de los anillos de los árboles entre las dos plantaciones	35
2.5.3 Relación de las características de los anillos de crecimiento con las condiciones climáticas	38
2.6 CONCLUSIÓN.....	41
CONCLUSIONES GENERALES	42
LITERATURA CITADA	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Características de los anillos de crecimiento en la base del árbol en parcelas con diferente intensidad de aclareo en plantaciones de <i>Pinus patula</i>	13
Figura 1.2 Tendencia de las características de los anillos de crecimiento en la sección intermedia y superior del fuste en parcelas con diferente intensidad de aclareo en plantaciones de <i>Pinus patula</i>	17
Figura 1.3 Coeficiente de forma a diferentes alturas del fuste en parcelas aclareadas con diferente intensidad en una plantación de <i>Pinus patula</i>	19
Figura 2.1 Distribución de los árboles en las parcelas de las plantación de 1995; a) Parcela 1, con aclareo ligero; b) Parcela 2, con aclareo moderado; c) Parcela 3, sin aclareo. Los puntos verdes = árboles en pie no muestreados, puntos azules = árboles en pie muestreados y puntos grises = tocones.	28
Figura 2.2 Comportamiento de las características de los anillos de crecimiento en las parcelas aclareadas y sin aclareo en dos plantaciones de <i>Pinus patula</i> de diferente edad.	33
Figura 2.3 Comparación de las características promedio de los anillos de crecimiento en las plantaciones de <i>Pinus patula</i> de diferente edad, después de eliminar el efecto de la edad cambial.	36
Figura 2.4 Correlación entre la AA, ATE y ATA con la TMIP, TMA, y PMA en plantaciones de <i>Pinus patula</i> (Plantación 1995 = 1999 – 2016, n = 18; Plantación 2005 = 2009 – 2016, n = 8).	39

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1 Historial de manejo y características dasométricas de las parcelas de <i>Pinus patula</i> muestreadas para el estudio.....	8
Cuadro 1.2 Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de los anillos de crecimiento radial en la base del árbol en parcelas con diferente intensidad de aclareo en <i>Pinus patula</i>	11
Cuadro 1.3 Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de los anillos de crecimiento radial en las secciones intermedia y superior del fuste en parcelas con diferente intensidad de aclareo en <i>Pinus patula</i> , incluyendo ICi como covariable en el modelo.	15
Cuadro 1.4 Resultados del análisis de varianza (valores de P) para el coeficiente de forma a diferentes alturas del fuste en parcelas de <i>Pinus patula</i> aclareadas con diferente intensidad.	18
Cuadro 2.1 Características dasométricas registradas en marzo de 2018 de las parcelas de <i>Pinus patula</i> en las dos plantaciones muestreadas.....	26
Cuadro 2.2 Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de los anillos de crecimiento de los árboles en parcelas aclareadas y testigo en plantaciones de <i>Pinus patula</i>	31
Cuadro 2.3 Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de los anillos de crecimiento ajustados por edad cambial entre los árboles de las dos plantaciones de <i>Pinus patula</i>	35
Cuadro 2.4 Coeficiente de correlación de Pearson entre las características de los anillos de crecimiento y las condiciones climáticas en dos plantaciones de <i>Pinus patula</i> ($n_{1995} = 18$; $n_{2005} = 8$).	38

INTRODUCCIÓN GENERAL

En México, los pinos son el grupo de gimnospermas con mayor dominancia de los bosques de coníferas en el país, con un registro de aproximadamente 42 especies y un alto porcentaje de endemismo (Sánchez-González, 2008). Los pinos mexicanos han sido introducidos a otros países para realizar ensayos genéticos y bancos de conservación de genes; dentro de este grupo se encuentra *Pinus patula*, destacado por su gran potencial de crecimiento y valor comercial (Bermejo y Pontones, 1999). Además, la especie presenta una buena conformación de copa, fuste recto y madera de buena calidad (Dvorak *et al.*, 2000).

La madera es el resultado de un complejo proceso de desarrollo; su calidad y cantidad está determinada a través del tiempo por la velocidad y duración de la producción de las células que conforman el xilema (Mauriat, *et al.*, 2014; Plomion *et al.*, 2001). La actividad del cambium es regulada por los procesos fisiológicos derivados de los órganos foliares en la copa del árbol; asimismo, las prácticas silvícolas (aclareos) y las condiciones del rodal, como la calidad de sitio y factores climáticos influyen en la formación de la madera (Larson *et al.*, 2001). Las prácticas silvícolas regulan el establecimiento, composición, estructura, crecimiento y función de los árboles en bosques bajo manejo, mediante el control de la densidad arbórea y la competencia entre ellos mismos (Puettmann *et al.*, 2016). Estos factores también son modificados por otras actividades de manejo como la fertilización, poda, aclareo y corta final de árboles individuales o rodales (Fujimori, 2001).

Los aclareos se han modificado a través del tiempo como respuesta a una variedad de cuestiones económicas y ecológicas (Puettmann *et al.*, 2016), fundamentada por el conocimiento de su impacto en el crecimiento de los individuos residuales (Bodner, 1983). Los árboles muestran una respuesta en el incremento radial, debido a un espacio de crecimiento mejorado para las copas de ellos, una menor competencia por la humedad y los nutrientes del suelo y mejor exposición de las ramas a la luz lateral; sin embargo la respuesta depende de la densidad inicial, la edad del árbol y la calidad del sitio (Bendtsen, 1978; Burschel, 1974). Por ello, conforme disminuye la competencia entre los árboles después del aclareo, los individuos residuales tienen mayor acceso a los recursos de crecimiento; en particular se invierte más en el crecimiento secundario, por lo

que producen anillos anuales más amplios, con mayor cantidad de madera temprana (Franceschini *et al.*, 2017).

La madera de las gimnospermas está formada por traqueidas, con diámetros grandes y paredes celulares delgadas en madera temprana y menor diámetro y paredes celulares más gruesas en la madera tardía (Rozas *et al.*, 2016; Olano *et al.*, 2012), lo que permite una identificación más clara y precisa de los anillos anuales de crecimiento y los factores climáticos que han condicionado su formación (Rozas *et al.*, 2011). La actividad cambial también está determinado por los factores climáticos del sitio donde se desarrolla la especie (Bernal-salazar y Salgado, 2000); Un aumento en temperatura favorece la elongación de los brotes, dando comienzo al crecimiento del anillo mediante la influencia de las fitohormonas (Camarero *et al.*, 1997).

En este contexto, en el presente trabajo se plantearon los objetivos siguientes: 1) evaluar el crecimiento radial y las características de los anillos de crecimiento a diferentes alturas del fuste, así como el coeficiente de forma del fuste en plantaciones jóvenes de *Pinus patula* que se aclarearon a los 9 y 13 años de edad, después de una intensa competencia por espaciamiento; 2) evaluar el comportamiento del crecimiento radial en plantaciones de diferentes edades sometidas a aclareos, así como la relación del crecimiento radial anual con la fluctuación anual de temperatura y precipitación.

Estos dos objetivos se abordan en los siguientes capítulos de la Tesis. En el primer capítulo se describe el estudio realizado para cumplir con el primer objetivo. Las hipótesis planteadas fueron: 1a) el aclareo ocasionará un aumento en la anchura de los anillos, pero una menor proporción de madera tardía; 1b) el efecto del aclareo sobre las características de los anillos de crecimiento será mayor en la base del árbol que a mayor altura del fuste; y 1c) el aclareo ocasionará un aumento en la conicidad del fuste del árbol. En el segundo capítulo se presenta el trabajo realizado en relación con el segundo objetivo. En dicho capítulo se evalúan las siguientes hipótesis: 2a) el crecimiento radial de los árboles aumenta con el espacio de crecimiento; 2b) la respuesta al espacio de crecimiento es mayor en la plantación joven; y 2c) la variación en el crecimiento radial anual se asocia con las condiciones de temperatura y precipitación en el año de formación del anillo.

CAPÍTULO I. CRECIMIENTO RADIAL Y COEFICIENTE DE FORMA DEL FUSTE EN PLANTACIONES ACLAREADAS DE *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham.

1.1 RESUMEN

Pinus patula Schiede ex Schltdl. et Cham. es una especie endémica de México, con gran relevancia económica por su alto potencial productivo en plantaciones forestales. La intensidad y frecuencia de aclareos generalmente influyen en la amplitud de los anillos anuales, la proporción de madera tardía y la conicidad del fuste. El objetivo del presente estudio consistió en evaluar el crecimiento radial y las características de los anillos de crecimiento a diferentes alturas del fuste, así como el coeficiente de forma del fuste en plantaciones jóvenes de *P. patula* aclareadas a 9 y 13 años de edad. Se seleccionaron y derribaron 10 árboles con dimensiones cercanas al diámetro promedio por parcela; obteniendo por árbol tres secciones transversales (rodajas) de 3 cm de grosor a diferentes alturas. Los aclareos aplicados en 2004 y 2008 causaron un impacto muy reducido sobre los anillos anuales y sus características en la sección basal; el efecto sobre los anillos sólo se observó en el año 2005, con efectos similares en el incremento en área basal y en la anchura de madera temprana, después la dinámica del crecimiento radial regresó a su patrón original. La anchura de anillos y sus componentes fue mayor en la parte intermedia y superior del fuste, ocasionando una reducción gradual en la conicidad, lo cual corrobora que la aplicación de los aclareos fue tardía, cuando la copa ya había retrocedido hacia la parte superior del árbol, debido a la elevada competencia por espacio en la plantación.

Palabras clave: anillos de crecimiento, índice de competencia, madera temprana, madera tardía, perfil del fuste.

1.2 ABSTRACT

Pinus patula Schiede ex Schltdl. et Cham. is an economically important native species in Mexico due to its large productive potential in forest plantations. Thinning intensity and frequency generally affect growth ring width, latewood proportion and stem taper. The objective of this study was to evaluate radial growth and growth ring traits along the stem height, as well as changes in stem taper of young *P. patula* plantations thinned at 9 and 13 years of age. Ten trees with a DBH close to the plot mean were selected and cut in each of two thinned plots, to obtain three radial sections along the stem height from each sampled tree. Thinnings applied in 2004 and 2008 had a reduced impact on growth ring traits in the basal section; the effect was noted only in the width of the 2005 growth ring, with similar effects in basal area increment and earlywood width. Afterwards, radial growth returned to its “before-thinning” trend. Annual rings and their components were wider at the medium and upper stem sections, causing a gradual reduction in stem tapering, which corroborated that thinnings were done too late, when the crown had already receded up in the stem due to the severe space competition in the plantation.

Keywords: competition index, earlywood, growth rings, latewood, stem taper

1.3 INTRODUCCIÓN

Pinus patula es una especie endémica de México con gran relevancia económica por su alto potencial productivo para el establecimiento de plantaciones de rápido crecimiento. El árbol presenta una buena conformación de copa, fuste recto y madera de buena calidad; es utilizado ampliamente en plantaciones en los países donde se ha introducido (Dvorak *et al.*, 2000). En México, se distribuye en forma natural en las regiones de la sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico y la sierra Madre de Oaxaca (Sánchez-González, 2008).

La madera, principal objetivo del cultivo de la especie, se origina del proceso biológico de la actividad mitótica del cambium secundario, que incluye la división celular, expansión celular, la diferenciación, la maduración, la muerte celular programada y la formación del duramen dentro del mismo árbol, para constituir el tejido del xilema (Plomion *et al.*, 2001). Se ha demostrado que la actividad cambial presenta alta sensibilidad a diferentes factores ambientales; por lo tanto, si se presentan cambios en alguno de los factores, como la competencia o la disponibilidad de agua, se modifica la dinámica estacional en los procesos de diferenciación celular y formación de la madera, con efectos positivos o negativos sobre la actividad del cambium (Gruber *et al.*, 2010).

La formación de la madera depende de factores ambientales, genéticos y fisiológicos. Entre los ambientales, las condiciones del sitio y las prácticas silvícolas ocasionan efectos en el crecimiento de los árboles y formación de madera, al modificarse la temperatura, la radiación y la disponibilidad de agua y nutrientes, así como el nivel de competencia entre los árboles (Balducci *et al.*, 2013; Swidrak *et al.*, 2011; Gruber *et al.*, 2010). La modificación en la fenología y tasa de crecimiento influye en las características anatómicas del xilema, lo que conduce a diferencias en la amplitud de los anillos de crecimiento, la cantidad de madera temprana y tardía, y la densidad de la madera, a lo largo del eje longitudinal del árbol (Larson, 1969).

A través de prácticas silvícolas, como los aclareos, es posible modificar las condiciones de desarrollo y afectar las características de los anillos de crecimiento (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011a). Después del aclareo, los individuos residuales tienden a reaccionar al espaciamiento entre ellos y se presenta un aumento en la velocidad de crecimiento. Debido a ello, el aclareo es la principal herramienta para el control de la densidad del arbolado, modificándose los patrones de partición de biomasa (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011b). Por el contrario, la aplicación tardía y ligera del

aclareo provoca la reducción en el ancho de los anillos, una mayor proporción de madera tardía y una forma más cilíndrica del fuste (Larson *et al.*, 2001). Por lo tanto, a largo plazo es trascendental evaluar la respuesta de los árboles residuales, en particular el crecimiento radial y las características de los anillos anuales que afectan la calidad de la madera (Vásquez-García *et al.*, 2016). Asimismo, determinar los posibles efectos negativos que podrían influir en su calidad; por ejemplo, el aumento en la proporción de madera juvenil, o la anchura de anillos, debido a la mayor cantidad de madera temprana y reducción de madera tardía (Hernández *et al.*, 1996).

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el crecimiento radial y las características de los anillos de crecimiento a diferentes alturas del fuste, así como el coeficiente de forma del fuste en plantaciones jóvenes de *Pinus patula* que se aclarearon a 9 y 13 años de edad, después de una intensa competencia por espaciamiento. El estudio se realizó en la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, una de las comunidades con mayor interés en plantaciones forestales de *P. patula*, con germoplasma proveniente de los rodales naturales. Las hipótesis del estudio son: a) el aclareo ocasionará un aumento en la anchura de los anillos, pero una menor proporción de madera tardía; b) el efecto del aclareo sobre las características de los anillos de crecimiento será mayor en la base del árbol que a mayor altura del fuste; y c) el aclareo ocasionará un aumento en la conicidad del fuste del árbol.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en una plantación de *Pinus patula* establecida en 1995 en el predio de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, a una altitud promedio de 2538 m, con coordenadas 17° 22' 38.3" N y 096° 28' 43.2" O. En la evaluación se incluyeron dos parcelas de 400 m² (20 x 20 m), establecidas en la plantación con fines de monitoreo permanente. Las parcelas se aclarearon con diferente intensidad, para propósitos de investigación en los años 2004 y 2008 y de acuerdo con el programa de manejo forestal del predio se aplicó un tercer aclareo en 2017. Sin embargo, para fines del estudio solo se consideraron los efectos de los aclareos en 2004 y 2008, ya que el muestreo se realizó en los árboles derribados durante el aclareo de 2017. El historial de manejo y las características dasométricas de las dos parcelas en estudio se presentan en el Cuadro 1.1.

1.4.2 Muestreo en campo

Durante el aclareo realizado en 2017 se tomaron muestras de la sección transversal (rodajas) del fuste de 10 árboles cosechados en cada parcela de estudio. Para la selección de los individuos a muestrear se utilizó la base de datos de diámetro normal (DN) a la altura de 1.30 m y altura total de los árboles, proporcionada por el prestador de servicios técnicos de la comunidad, para conocer la estructura diamétrica de cada parcela. Posteriormente, en cada una de ellas se seleccionaron 10 individuos con dimensiones cercanas al diámetro promedio por parcela (24 cm en la parcela 1 y 26 cm en la parcela 2). El derribo se realizó en el mes de marzo de 2017, a una altura de 30 cm sobre el nivel del suelo. Las variables dasométricas registradas en campo fueron: diámetro de la base (DB), DN, diámetro en la base de la tercera troza, es decir, a 5.04 m que corresponden a dos trozas comerciales (D intermedio), diámetro en el extremo distal de la última troza comercial (D punta) y la longitud de la base del árbol hasta la última troza comercial (LONG B-P). Cada árbol se identificó con el número de parcela y número de derribo.

Cuadro 1.1 Historial de manejo y características dasométricas de las parcelas de *Pinus patula* muestreadas para el estudio.

Año[§]	Características dasométricas	Parcela 1	Parcela 2
2004-A	NA	3600	3650
	DN	10.40	9.70
	AB (m ² ha ⁻¹)	38.27	30.25
	VOL (m ³ ha ⁻¹)	145.98	112.10
2004-D	NA	1400	2650
	DN	16.30	10.80
	AB (m ² ha ⁻¹)	30.06	26.32
	VOL (m ³ ha ⁻¹)	123.93	99.88
2008-A	NA	1400	2650
	DN	20.10	15.30
	AB (m ² ha ⁻¹)	46.02	52.06
	VOL (m ³ ha ⁻¹)	298.37	281.86
2008-D	NA	1250	2200
	DN	20.70	16.20
	AB (m ² ha ⁻¹)	43.25	47.87
	VOL (m ³ ha ⁻¹)	280.45	261.89

[§]Los valores de 2004-A y 2008-A son promedio antes del aclareo; los valores de 2004-D y 2008-D se refiere al promedio después del aclareo. NA: número de árboles, DN: diámetro normal, AB: área basal y VOL: volumen total. Fuente: Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012).

Una vez derribados los árboles, de cada uno se obtuvieron tres secciones transversales (rodajas) de 3 cm de grueso a diferentes alturas del fuste. La primera rodaja se obtuvo en la base a 30 cm del suelo, la segunda en la base de la tercera troza comercial y la tercera en el extremo distal de la última troza comercial (tercera o cuarta troza, en función de las dimensiones de los árboles). Al momento de derribar el árbol y obtener las rodajas, se identificó la dirección norte en ellas, con el propósito de asegurar que las mediciones en las muestras se realicen en la misma orientación cardinal. Se almacenaron a la sombra en un ambiente fresco (temperatura menor de 20 °C) durante 15 días, para permitir la pérdida de humedad y después se seccionaron en forma de cruz, con un

ancho de 4 cm. La sección principal se mantuvo en dirección norte-sur. Estas se pulieron con lijas de agua (grano de 240 y 1000), para una visualización más detallada de los anillos de crecimiento.

1.4.3 Medición de árboles vecinos

Al momento del muestreo en campo se midieron los cuatro árboles vecinos más cercanos al árbol objetivo (un árbol por cuadrante), para estimar la densidad arbórea por parcela antes de la aplicación del aclareo y determinar el índice de competencia por árbol. Para esto se posicionó en el tocón del árbol objetivo y se establecieron los cuadrantes de acuerdo con la orientación cardinal (N, E, S, y W). En cada cuadrante se identificó el árbol más cercano, en el cual se midió el diámetro normal (DN), la altura total y la distancia al árbol derribado. Con estos datos se calculó el índice de competencia para cada árbol derribado (IC_i), con la fórmula siguiente:

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

Donde IC_i = índice de competencia del i -ésimo árbol muestreado; DN_j = diámetro del j -ésimo árbol vecino; d_{ij} = distancia del j -ésimo árbol vecino al i -ésimo árbol objetivo.

1.4.4 Procesamiento de muestras en laboratorio

Las muestras de madera se escanearon y las imágenes obtenidas se procesaron con el software WINDENDRO^{TN} 2008. En cada imagen de las muestras, previamente identificadas, se contaron los anillos de crecimiento por radio (1 y 2), tomando como referencia el último anillo formado en el año 2016. Una vez identificado el año de formación de cada anillo en las muestras, se midió la anchura del anillo (AA) y la anchura de la sección de madera temprana (ATE) y madera tardía (ATA) en cada uno de ellos. Con estos datos se obtuvo la proporción de madera tardía (PT) en cada anillo, de la siguiente forma:

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

Con los datos de anchura de anillo por radio se determinó el incremento en área basal por año. Para ello, se generó el crecimiento acumulado en diámetro y área basal por año y, por diferencia con respecto al valor del año previo, se obtuvo el incremento en área basal. Con los datos de crecimiento acumulado en diámetro, obtenidos a partir de la anchura de los anillos anuales de crecimiento a diferentes alturas, se obtuvo el índice de forma para cada uno de los árboles muestreados. En total, se obtuvieron tres índices de forma (las relaciones entre el diámetro de las

secciones intermedia y superior con el diámetro de la sección basal y la relación entre el diámetro de la sección superior con el de la sección intermedia), como un indicador del efecto de los aclareos en la distribución del crecimiento en diámetro en el perfil vertical del fuste. Dado que las rodajas de la sección superior no se tomaron a la misma altura del fuste (la mayoría de ellas se tomó en la parte distal de la cuarta troza), el diámetro acumulado en diámetro se ajustó a una misma altura, suponiendo una reducción gradual por cada metro de longitud con base en la reducción del diámetro de la tercera troza del árbol respectivo.

1.4.5 Análisis estadísticos de los datos

Con los datos obtenidos de las muestras se realizó un análisis de varianza con el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS, versión 9.4 (SAS Institute, 2004) para evaluar el efecto de los aclareos aplicados en 2004 y 2008 sobre las características de los anillos de crecimiento y obtener los valores promedio por parcela, para las cinco variables representadas en las muestras. Los análisis se efectuaron por separado en cada una de las secciones muestreadas a diferentes alturas del fuste de los árboles. Para determinar si la variación en la distribución espacial de los árboles dentro de las parcelas influyó en las características de los anillos de crecimiento anual, se realizó un segundo análisis incluyendo como covariable en el modelo el índice de competencia estimado para cada árbol muestreado. De la misma manera, con los valores de coeficientes de forma por árbol se realizó un análisis de varianza con el procedimiento GLM para evaluar diferencias entre parcelas en estas variables.

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1 Efecto del aclareo en las características de los anillos de crecimiento en la base del árbol

El análisis de varianza con el modelo original no mostró diferencias significativas ($P \leq 0.10$) en la mayoría de las características de los anillos evaluadas durante el periodo de 2004 a 2016 (Cuadro 1.2). La inclusión del índice de competencia como covariable en el modelo permitió detectar un mayor número de variables con diferencias significativas entre las dos parcelas muestreadas en los últimos años (2013-2016), pero no en los años previos (Cuadro 1.2). En 2013 hubo diferencias significativas ($P \leq 0.10$) en la anchura del anillo y de la madera tardía, y en el incremento en área basal, mientras que en 2015 hubo diferencias significativas en todas las variables, excepto en la proporción de madera tardía. Aun cuando, en los años siguientes a los aclareos realizados en 2004 y 2008, solo se encontraron diferencias significativas en el incremento en área basal (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2 Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de los anillos de crecimiento radial en la base del árbol en parcelas con diferente intensidad de aclareo en *Pinus patula*.

Año de formación	Modelo original					Modelo con IC _i como covariable				
	AA	IAB	ATE	ATA	PT	AA	IAB	ATE	ATA	PT
2004	0.839	0.531	0.924	0.756	0.966	0.404	0.557	0.487	0.508	0.740
2005	0.240	0.031	0.227	0.366	0.786	0.524	0.041	0.479	0.562	0.985
2006	0.477	0.110	0.274	0.813	0.319	0.962	0.278	0.559	0.751	0.316
2007	0.399	0.111	0.970	0.281	0.305	0.902	0.293	0.436	0.608	0.183
2008	0.508	0.205	0.522	0.572	0.819	0.751	0.624	0.760	0.975	0.926
2009	0.243	0.096	0.349	0.420	0.608	0.646	0.279	0.815	0.512	0.993
2010	0.081	0.042	0.067	0.146	0.284	0.252	0.123	0.228	0.330	0.623
2011	0.825	0.479	0.722	0.786	0.442	0.819	0.749	0.873	0.664	0.633
2012	0.288	0.149	0.194	0.986	0.116	0.231	0.128	0.163	0.830	0.132
2013	0.118	0.080	0.106	0.193	0.774	0.097	0.071	0.109	0.094	0.877
2014	0.304	0.176	0.194	0.488	0.768	0.210	0.119	0.174	0.303	0.928
2015	0.124	0.074	0.094	0.120	0.769	0.072	0.046	0.054	0.100	0.455
2016	0.200	0.095	0.194	0.030	0.010	0.155	0.064	0.167	0.037	0.064

AA = ancho de anillo; IAB = incremento de área basal; ATE = ancho de madera temprana; ATA = ancho de madera tardía; PT = proporción de madera tardía. IC_i: índice de competencia individual.

Los árboles en las parcelas estudiadas muestran el mismo patrón de comportamiento en las características de los anillos anuales (Figura 1.1). En ambos casos, los anillos son amplios en los

primeros años de vida del árbol y, posteriormente, tanto la anchura del anillo como la de la madera temprana y tardía tienden a disminuir de manera gradual, con una pendiente pronunciada que se suaviza y estabiliza en los últimos años. El incremento en área basal (IAB), más sensible al efecto de la edad y la competencia por espacio, mostró un aumento rápido en los primeros 8 años y después empezó a declinar (Figura 1.1b). En esta característica se nota el efecto del aclareo realizado en 2004, con el aumento registrado en el año 2005 y, después en los años 2013 y 2016, en especial en la Parcela 1, donde el aclareo fue más intenso. A diferencia de las variables anteriores, la proporción de madera tardía aumentó gradualmente con la edad, aunque con ligeras reducciones en algunos años (Figura 1.1e). En los años que se detectaron diferencias significativas en las características de los anillos entre las dos parcelas, las diferencias fueron a favor de la Parcela 1, en donde se realizó un aclareo más intenso en 2004 y 2008, dejando un menor número de árboles en pie (Cuadro 1.1).

En general, los aclareos ocasionan un aumento en el crecimiento radial de los árboles al generar una apertura en el dosel y reducir la competencia por espacio (Koga *et al.*, 1997); en diferentes estudios se ha encontrado que el efecto es mayor conforme aumenta la intensidad del aclareo (Zhang *et al.*, 2006). Por ejemplo, en *Picea mariana* encontraron que el crecimiento radial de los árboles residuales aumentó de 0.07 cm a 0.14 cm después de la aplicación del aclareo con una intensidad de 30 a 35% de área basal (Pamerleau-Couture *et al.*, 2015).

En ese sentido, se esperaba encontrar un aumento en la anchura de los anillos de crecimiento por efecto de los aclareos realizados en 2004 y 2008, especialmente en los individuos de la Parcela 1, donde el primer aclareo removi60% de los árboles y 20% de su AB. Sin embargo, el efecto en el aumento de la anchura del anillo sólo se observó en el año 2005, un año después del aclareo, con efectos similares en el incremento en área basal y en la anchura de madera temprana, después la dinámica del crecimiento radial regresó a su patrón original (Figura 1.1), con una reducción gradual en estas características. De la misma manera, el aclareo aplicado en 2008 no tuvo mayor impacto en el comportamiento de las características de los anillos, aunque de manera esporádica se encontraron diferencias en algunas de ellas entre las dos parcelas.

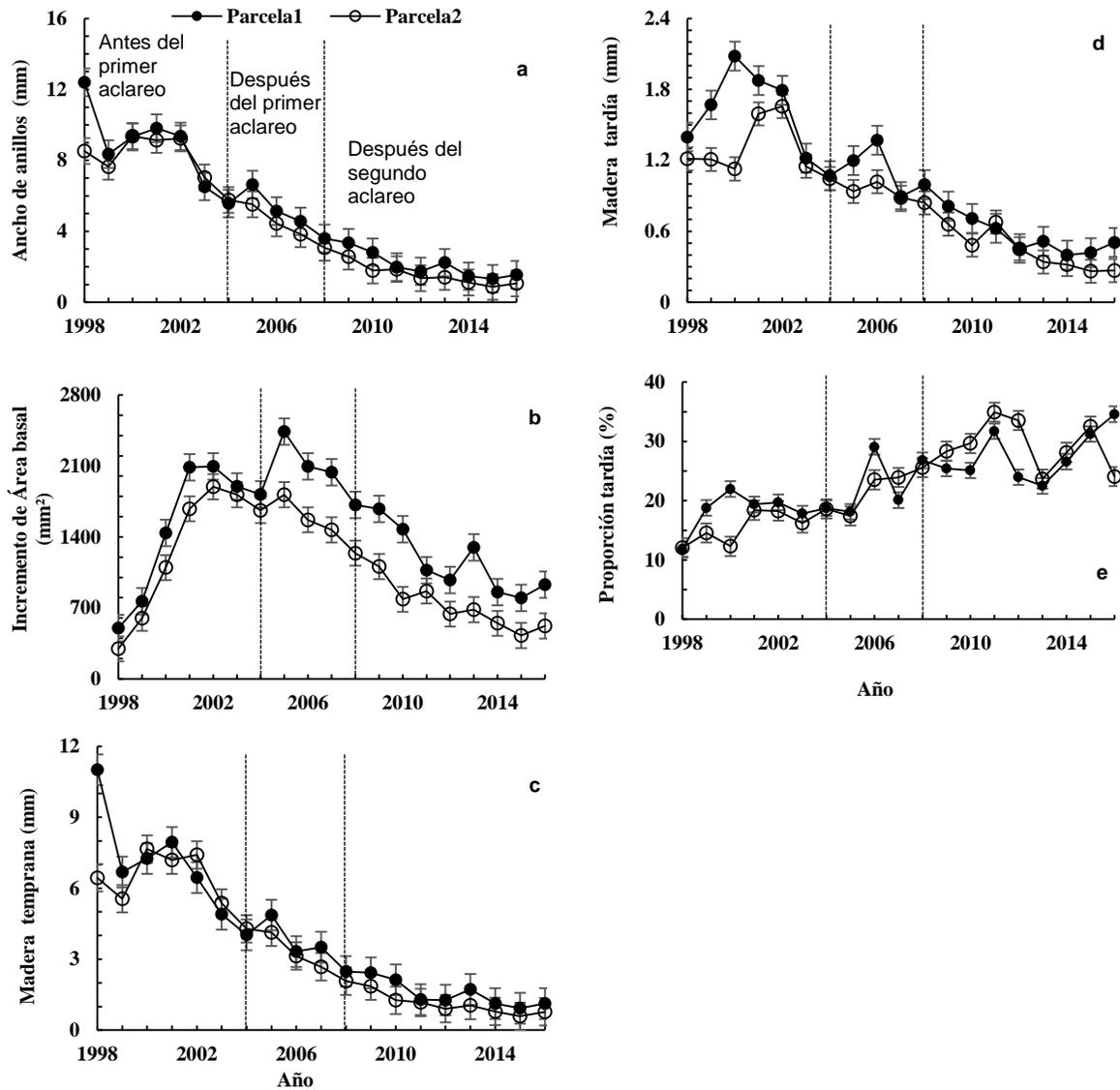


Figura 1.1 Características de los anillos de crecimiento en la base del árbol en parcelas con diferente intensidad de aclareo en plantaciones de *Pinus patula*.

El impacto reducido de los aclareos sobre las características de los anillos de crecimiento se puede deber a que éste se aplicó demasiado tarde, considerando la densidad inicial de plantación y el elevado nivel de competencia existente desde los primeros años de crecimiento de los árboles, o a que la intensidad del aclareo aplicado no fue suficiente para revertir el efecto ocasionado por la elevada competencia de los árboles en las dos parcelas. Los datos de las parcelas muestran que la densidad de la plantación antes del aclareo de 2004 era excesiva (3600 o más árboles ha⁻¹), y con un diámetro normal promedio bajo, considerando la tasa de crecimiento promedio de la especie

y las condiciones ambientales favorables de la región de estudio (Rodríguez-Ortiz *et al.* 2012). Además, el patrón de las características de los anillos de crecimiento muestra que 2 a 3 años antes de aplicar el aclareo, se inició una reducción acelerada en la anchura del anillo y de sus características asociadas (madera temprana y tardía).

A pesar, de que en la Parcela 1 se eliminó 60% de los árboles, no se ocasionó un efecto significativo de largo plazo en las características de los anillos con respecto a la Parcela 2, en donde la intensidad del aclareo fue menor de 30%. Al parecer, la elevada competencia inicial previa al aclareo ocasionó una reducción drástica en el tamaño de la copa viva, que anuló el efecto sobre el crecimiento radial en la parte baja del fuste, como se ha encontrado en otras especies de coníferas (Fabris, 2000). Estos factores también explican el reducido efecto del aclareo realizado en 2008, cuando la intensidad de corta fue menor de 20% en ambas parcelas (aclareo muy ligero) y la copa se había retraído todavía más debido a la elevada competencia por espacio en la plantación (1400 y 2650 árboles ha⁻¹ antes del aclareo). Goche-Télles *et al.*, (2003), muestran que aunque existen varios factores que influyen en la formación de la madera y, por lo tanto, en las características de los anillos de crecimiento, en estas se reflejarán de manera directa el efecto de la edad, la competencia y la historia de manejo de la plantación.

1.5.2 Efecto del aclareo en las características de los anillos a diferentes alturas del fuste

Las características de los anillos de crecimiento en las secciones intermedia y superior del fuste mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.10$) entre las parcelas aclareadas solo en los primeros años de formación, pero no en los últimos años (Cuadro 1.3). Los efectos fueron más notorios en la sección intermedia durante el periodo 2008-2011, con diferencias en la anchura del anillo y en uno o varios de sus componentes de madera temprana y tardía. En la sección superior solo se encontraron diferencias en la anchura del anillo y de la madera temprana en 2012 (Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3 Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de los anillos de crecimiento radial en las secciones intermedia y superior del fuste en parcelas con diferente intensidad de aclareo en *Pinus patula*, incluyendo ICi como covariable en el modelo.

Año de formación	Sección intermedia					Sección superior				
	AA	IAB	ATE	ATA	PT	AA	IAB	ATE	ATA	PT
2008	0.074	0.077	0.057	0.788	0.329					
2009	0.031	0.535	0.041	0.727	0.915					
2010	0.059	0.644	0.106	0.102	0.822					
2011	0.029	0.631	0.014	0.908	0.019					
2012	0.267	0.658	0.100	0.109	0.051	0.038	0.863	0.028	0.210	0.494
2013	0.374	0.877	0.268	0.916	0.767	0.206	0.909	0.196	0.452	0.473
2014	0.693	0.268	0.916	0.725	0.983	0.203	0.429	0.273	0.246	0.889
2015	0.168	0.114	0.216	0.180	0.835	0.316	0.522	0.263	0.587	0.730
2016	0.629	0.406	0.772	0.388	0.218	0.945	0.706	0.955	0.665	0.240

AA = ancho de anillo; IAB = incremento de área basal; ATE = ancho de madera temprana; ATA = ancho de madera tardía; PT = proporción de madera tardía.

El patrón de comportamiento de las características de los anillos en las secciones intermedia y superior del fuste en las dos parcelas de evaluación fue similar al observado para la sección basal, aunque con una pendiente más suave (Figura 1.2). Mientras que, a diferencia de lo ocurrido en la base, las diferencias significativas encontradas entre las parcelas en estas características, fueron mayores para los individuos en la Parcela 2, excepto en el caso de IAB (Figura 1.2).

La anchura de los anillos en la sección intermedia y superior del fuste mostró diferencias significativas entre los individuos de las dos parcelas aclareadas, en especial en los primeros años después del aclareo realizado en 2008 (Cuadro 1.3). Sin embargo, el hecho de que la mayor anchura de anillo y de madera temprana se registrara en la parcela con mayor número de individuos residuales (mayor competencia), indica que las diferencias se deben más bien al efecto de la posición de la copa en los árboles y no al efecto del aclareo. La respuesta común de los árboles a un aclareo es un aumento en el crecimiento radial a lo largo de todo el fuste, en particular en la

parte baja, debido al mayor tamaño de copa que mantienen estos al reducirse la competencia lateral (Winck *et al.*, 2015; Tong *et al.*, 2011).

En ese contexto, se esperaba que los árboles en la Parcela 1, con menor competencia, presentaran anillos más anchos que los de la Parcela 2 a lo largo del fuste, lo cual no ocurrió. Estudios realizados con diferentes intensidades de poda de la copa muestran que al reducir el tamaño de la copa viva ocurre un desplazamiento hacia arriba del fuste en la actividad del cambium, modificando el patrón de crecimiento radial del árbol a lo largo de su eje debido a la menor disponibilidad de carbohidratos en la parte baja del árbol (Ferrere *et al.*, 2015; Balducci *et al.*, 2013). Este patrón manifiesta que la anchura del anillo en un mismo año de crecimiento es menor en la parte baja del fuste que en la parte intermedia o superior, como se ha demostrado en otras especies (Cown, 1972).

Los datos de las Figuras 1.1 y 1.2 muestran que el crecimiento radial de los árboles de *Pinus patula* en el periodo de 2008 a 2016 es dos veces mayor en las secciones intermedia y superior que en la basal, y el efecto es mayor en la Parcela 2 donde hay mayor competencia por espacio, lo que corrobora este desplazamiento en el perfil longitudinal de la actividad del cambium asociado a la reducción en el tamaño de la copa de los árboles (Gruber *et al.*, 2010; Gartner *et al.*, 2002).

A pesar que la anchura de los anillos en las secciones intermedia y superior fue mayor en los árboles de la Parcela 2, el incremento en área basal fue similar o incluso superior a aquellos de la Parcela 1 (Figura 1.2). Esto se debe a que los árboles de la Parcela 1 tenían mayor altura promedio al momento de realizar los aclareos y, por lo tanto, tenían en la sección intermedia y superior anillos de crecimiento acumulados previos al primer año de medición en cada sección. Esto ocasionó una mayor área en la corona circular representada por el anillo correspondiente.

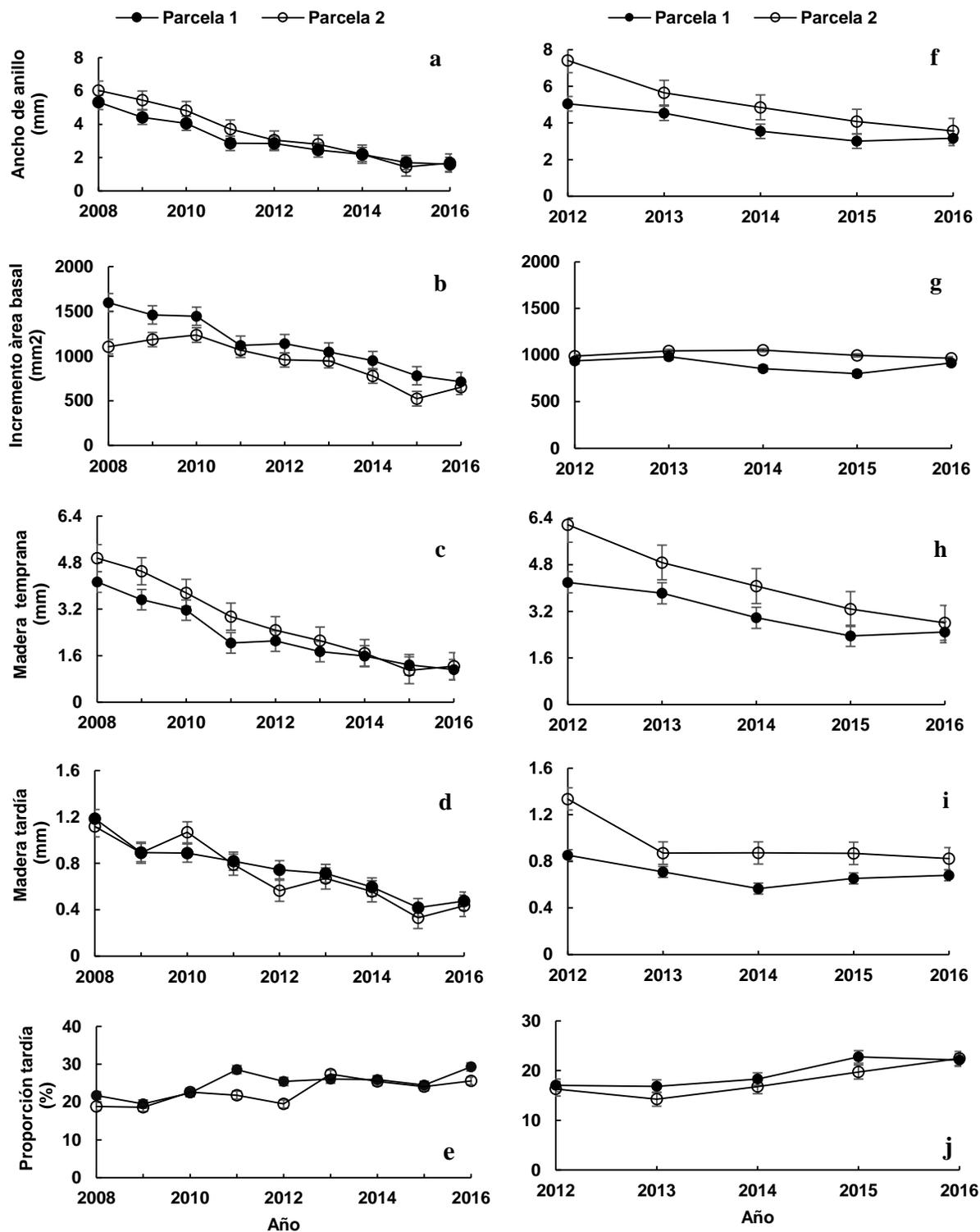


Figura 1.2 Tendencia de las características de los anillos de crecimiento en la sección intermedia y superior del fuste en parcelas con diferente intensidad de aclareo en plantaciones de *Pinus patula*.

1.5.3 Efecto del aclareo en el coeficiente de forma del fuste

El análisis de varianza no mostró diferencias significativas ($P > 0.10$) entre las dos parcelas aclareadas en los coeficientes de forma del fuste estimados a partir del diámetro acumulado en las secciones transversales a diferentes alturas del mismo (Cuadro 1.4).

Cuadro 1.4 Resultados del análisis de varianza (valores de P) para el coeficiente de forma a diferentes alturas del fuste en parcelas de *Pinus patula* aclareadas con diferente intensidad.

Años de formación	CF _{ib}	CF _{sb}	CF _{si}
2004	0.491		
2005	0.704		
2006	0.368		
2007	0.335		
2008	0.311		
2009	0.294	0.161	0.486
2010	0.287	0.510	0.983
2011	0.286	0.564	0.736
2012	0.284	0.277	0.822
2013	0.290	0.316	0.945
2014	0.298	0.372	0.930
2015	0.309	0.440	0.814
2016	0.324	0.517	0.712

CF_{ib}, CF_{sb}, CF_{si}: coeficiente de forma intermedio-base, coeficiente de forma superior-base y coeficiente de forma superior-intermedio.

El coeficiente de forma aumentó gradualmente con la edad de los árboles en las dos parcelas (Figura 1.3), debido tanto a la mayor acumulación relativa de los anillos de crecimiento en las secciones intermedia y superior, como a la mayor anchura de los anillos de crecimiento en estas secciones en un mismo año (Figuras 1.1 y 1.2). A diferencia de lo que ocurre con CF_{sb} y CF_{si}, CF_{ib} se estabiliza en los valores cercanos a 0.5 en los últimos años de crecimiento.

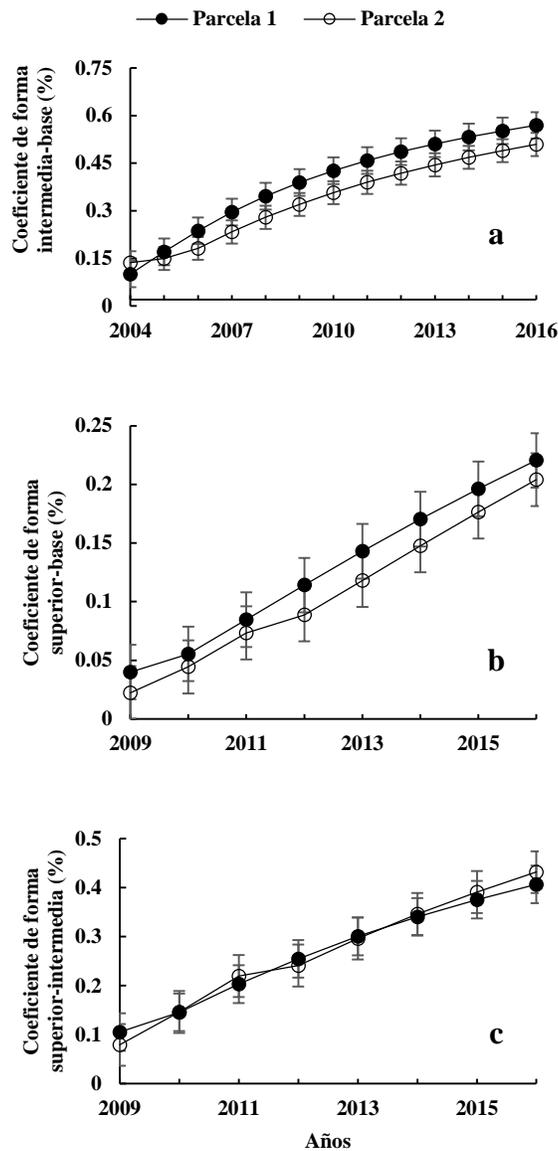


Figura 1.3 Coeficiente de forma a diferentes alturas del fuste en parcelas aclareadas con diferente intensidad en una plantación de *Pinus patula*.

El coeficiente de forma permite evaluar el grado de conicidad (o cilindridad) del fuste de los árboles. De acuerdo a la literatura revisada, se espera que la aplicación de aclareos ocasionará un aumento en la conicidad del árbol (es decir, se reduzca el valor del coeficiente de forma), al mantener una mayor longitud de copa y aumentar en mayor grado el crecimiento radial en la base del árbol (Pape, 1999), mientras que la aplicación de podas ocasione una reducción de la conicidad

al generar un desplazamiento de la actividad cambial y un mayor crecimiento radial de los anillos en la parte superior de la copa (Fernández *et al.*, 2017; Pinkard y Beadle, 2000).

Los resultados muestran que no hubo diferencias entre las parcelas en ninguno de los coeficientes de forma calculados, lo cual corrobora el reducido impacto de los aclareos aplicados en el crecimiento radial. Sin embargo, a lo largo del periodo de estudio, en los árboles de ambas parcelas se observa un patrón claro de aumento en el coeficiente de forma, hasta alcanzar valores de 0.40 hasta 0.56, lo que implica una reducción gradual de la conicidad. Este patrón de respuesta es más bien característico del efecto ocasionado por tratamientos de poda de la copa (Fernández *et al.* 2017) y refleja, la respuesta en el patrón longitudinal del crecimiento radial de los árboles debido a la reducción drástica del tamaño de la copa, por la excesiva competencia de los individuos, antes y después de los aclareos. Es decir, los aclareos se aplicaron tarde y no tuvieron la intensidad suficiente para revertir el proceso de recesión de la copa ocasionada por la alta densidad de población en la plantación. En un estudio realizado en bosques manejados de *Pinus patula* se demostró el coeficiente de forma del árbol varía con la intensidad del manejo de la densidad con valores de 0.44 en bosque natural, 0.46 en bosque con manejo intensivo y 0.50 en plantaciones con mayor competencia (Uranga-Valencia *et al.*, 2015).

1.6 CONCLUSIÓN

Los aclareos aplicados en 2004 y 2008 en la plantación de *Pinus patula* tuvieron un impacto reducido en estimular el crecimiento radial del fuste y modificar las características de los anillos de crecimiento. El análisis de las características de los anillos, con respecto a la edad de los árboles, muestra una reducción drástica en la anchura del anillo y sus componentes (madera temprana y tardía) en los años previos a la aplicación del primer aclareo, debido a la excesiva competencia ocasionada por el espaciamiento reducido de los árboles en la plantación. El atraso en la aplicación del aclareo y la elevada densidad de población residual, aun en el aclareo de mayor intensidad, impidieron revertir la tendencia en la reducción gradual de la anchura de los anillos de crecimiento o modificar la relación entre la madera temprana y tardía. La mayor anchura de anillos y sus componentes en la parte intermedia y superior del fuste, ocasionaron una reducción gradual en la conicidad, lo cual corrobora que la aplicación de los aclareos fue tardía, cuando ya había ocurrido la recesión de la copa debido a la elevada competencia por espacio, ocasionando un desplazamiento hacia la parte superior del fuste del patrón de crecimiento radial de los árboles.

CAPÍTULO II. CRECIMIENTO RADIAL EN *Pinus patula* Y SU RELACIÓN CON EL ESPACIO DE CRECIMIENTO Y LOS FACTORES CLIMÁTICOS

2.1 RESUMEN

La variación anual en las características de los anillos de crecimiento tiene repercusiones importantes en la calidad de la madera. El objetivo del presente estudio fue evaluar el comportamiento de las características de los anillos de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* establecidas en 1995 y 2005, sometidas a aclareos, y la relación de estas características con la fluctuación anual de temperatura y precipitación en esos sitios. Se analizaron los anillos de crecimiento y sus características en muestras de madera extraídas con taladro de Pressler en las dos plantaciones y se relacionaron con los datos climáticos en los años de formación. En la plantación de 1995 no se encontraron diferencias significativas en las características de los anillos entre las parcelas con y sin aclareo durante los años 1999-2017, debido a que estuvieron expuestas a una intensidad de competencia similar. En la plantación de 2005 los árboles en la parcela con mayor espacio de crecimiento (debido a un menor porcentaje de supervivencia inicial) mostraron mayor anchura de anillos, madera temprana e incremento en área basal que los árboles en la parcela sin aclareo. En promedio, la plantación más joven presentó mayor anchura de anillos y de madera temprana, asociado a una menor competencia por el mayor espaciamiento utilizado en ella. En la plantación de 1995, la anchura de anillo, madera temprana y madera tardía se asociaron de manera positiva ($r \geq 0.40$) con la temperatura mínima promedio, mientras que en la plantación 2005 solo la anchura de madera tardía se asoció en forma positiva con la temperatura promedio y en forma negativa con la precipitación anual.

Palabras clave: aclareos, anillos de crecimiento, clima, competencia, madera temprana, madera tardía.

2.2 ABSTRACT

The annual variation in growth ring traits has important impacts on wood quality. The objective of this study was to evaluate the trend of growth ring traits in *Pinus patula* plantations established in 1995 and 2005, subjected to thinnings, and the relationship of these traits with the annual fluctuation of temperature and rainfall on those sites. The growth rings and their traits were analyzed in wood core samples extracted with a Pressler drill from both plantations and were related to the climatic data during their respective formation years. In the 1995 plantation no significant differences were found in rings traits between thinned and control plots during the 1999-2017 growth period, because trees were exposed to a similar competition intensity. In the 2005 plantation trees in the most widely-spaced plot (due to a lower percentage of initial survival) showed greater ring width, earlywood and basal area increment than trees in the control plot. On average, the youngest plantation showed wider annual rings and earlywood due to a lower competition from the wider spacing used in it. In the 1995 plantation, annual ring, earlywood, and latewood width were positively associated ($r \geq 0.40$) with the average annual minimum temperature, whereas in the 2005 plantation only latewood width was positively correlated with mean annual temperature and negatively with annual rainfall.

Keys word: thinnings, growth rings, climate, competition, earlywood, latewood

2.3 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las plantaciones forestales desarrollan un papel importante para satisfacer las necesidades de fibra, madera y sus derivados de la sociedad (Schimleck *et al.*, 2018); por ello, los programas de mejoramiento genético se centran en especies prioritarias para aumentar la productividad (McKeand *et al.*, 2003), utilizando silvicultura intensiva. El crecimiento de los árboles es el resultado del balance entre el potencial de crecimiento fisiológico, que depende de la actividad fotosintética y de la capacidad de absorción de nutrientes, y las restricciones al crecimiento ocasionadas por el espacio disponible de los árboles, que considera la competencia con otros individuos y las limitaciones en la disponibilidad de recursos (Álvarez-Taboada *et al.*, 2003).

El espaciamiento inicial de los árboles influye en la programación de los tratamientos silvícolas (Hébert *et al.*, 2016). Por ello, realizar una buena combinación del espacio de crecimiento con la edad de rotación, calidad del sitio y tratamientos silvícolas, en particular las podas y aclareos, favorece a las propiedades de la madera y la morfología de los árboles (Hébert *et al.*, 2016; Guerra-Bugueño *et al.*, 2014). El espaciamiento influye en varios aspectos, como el volumen total, el volumen individual del árbol, la forma del árbol, el tamaño de las ramas y la zona de la madera juvenil (Macdonald y Hubert, 2002).

Por otra parte, el clima es un factor determinante en la formación de los anillos de crecimiento (Haghshenas *et al.*, 2016); existen varios estudios que relacionan la tasa de crecimiento radial y las características de los anillos con variables ambientales como la temperatura, precipitación y disponibilidad de la luz (García-Suárez *et al.*, 2009), así como los cambios en las características de los anillos con los gradientes de elevación (Hernández y Castellanos, 2006); por ejemplo, se ha encontrado que la precipitación durante el invierno y a principios de la primavera influyen en gran medida en el crecimiento radial de *Pinus halepensis*, en especial en la formación de madera temprana (Olivar *et al.*, 2013; Olivar *et al.*, 2012). En particular, en *Pinus patula* se ha demostrado que poblaciones de sitios más elevados son menos productivas que las poblaciones que crecen a menor elevación; pero, 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-García *et al.*, 1999).

Debido a lo anterior, las características de los anillos de crecimiento son variables importantes y confiables para evaluar el efecto de las condiciones ambientales y el espacio de crecimiento en la productividad de los árboles y la calidad de la madera (Zhu *et al.*, 2007). Entender esta relación facilita el estudio de las propiedades de la madera y permite separar el efecto de la edad, asociado a los procesos fisiológicos del desarrollo del árbol, con respecto al efecto de los factores ambientales del sitio. El objetivo del presente estudio fue evaluar el comportamiento del crecimiento radial de *Pinus patula* en plantaciones de diferentes edades sometidas a aclareos, así como la relación del crecimiento radial anual con la fluctuación anual de temperatura y precipitación. Las hipótesis del estudio son: a) el crecimiento radial de los árboles aumenta con el espacio de crecimiento; b) la respuesta al espacio de crecimiento es mayor en la plantación joven; y c) la variación en el crecimiento radial anual se asocia con las condiciones de temperatura y precipitación en el año de formación del anillo.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en dos plantaciones de *Pinus patula* ubicadas en el predio de la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. La primera fue establecida en 1995 a una elevación de 2,538 m, con coordenadas 17° 22' 38.3" N y 96° 28' 43.2" O, manejadas a un espaciamiento inicial de 1.5 x 1.5 m, con densidad inicial de 4444 árboles ha⁻¹. La segunda plantación se estableció en 2005, a una elevación de 2877 m, con coordenadas 17° 40' 17.63" N y 96° 46' 05.28" O, a un espaciamiento de 2.5 x 2.5 m, con densidad inicial de 1600 árboles ha⁻¹.

En cada plantación se evaluó una muestra de 10 individuos por parcela, en tres parcelas de 400 m² (20 x 20 m), incluyendo dos parcelas aclareadas en 2016 (Plantación 2005) y en 2004, 2008 y 2017 (Plantación 1995) y una parcela sin aclareo. Los aclareos realizados en 2004 y 2008 fueron con fines de investigación, y los aplicados en 2016 y 2017 de acuerdo al Programa de Manejo Forestal Maderable del predio. En la plantación 1995, en la aplicación del tercer aclareo (2017), se removió 20 % (Parcela 1) y 28 % (Parcela 2) del número de árboles por hectárea, mientras que en la plantación 2005, en el aclareo de 2016 se removió 16 % (Parcela 1) y 26 % (Parcela 2) de los individuos presentes en las parcelas. Sin embargo, se estimó que el número de árboles antes del aclareo era 1175 árboles ha⁻¹ (Parcela 1) y 950 árboles ha⁻¹ (Parcela 2). En 2018, se hicieron mediciones de diámetro normal (DN), altura total (AT) y se estimó el área basal (AB m² ha⁻¹) y volumen total (VT en m³) de las parcelas muestreadas en cada plantación (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Características dasométricas registradas en marzo de 2018 de las parcelas de *Pinus patula* en las dos plantaciones muestreadas.

Plantación	Característica dasométrica	Parcela 1 (aclareo ligero)	Parcela 2 (aclareo moderado)	Parcela 3 (sin aclareo)
1995	NA	950	825	2475
	DAP	24.20	27.20	19.73
	AB (m ² ha ⁻¹)	46.11	58.51	30.98
	VOL (m ³ ha ⁻¹)	107.81	131.88	68.30
2005	NA	1175	700	1550
	DAP	14.95	16.85	13.65
	AB (m ² ha ⁻¹)	18.41	23.44	15.34
	VOL (m ³ ha ⁻¹)	42.35	44.50	39.65

NA = número de árboles, DAP = diámetro normal, AB = área basal; VOL = volumen total

2.4.2 Muestreo de los árboles

Se generó un plano de distribución espacial de los árboles en las parcelas muestreadas. Para ello, 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 en cada parcela. Los datos registrados se vaciaron en una hoja Excel versión 2013, y fueron importados al software Quantum GIS (QGIS 2002) versión 2.18.20 mediante el cual se creó el plano de distribución por parcela. En la Figura 1 se muestra la distribución espacial de los árboles en las parcelas de la plantación de 1995.

Con base en la distribución espacial de los árboles en cada parcela, se seleccionaron 10 de ellos, tratando de que fueran representativos del nivel de competencia promedio existente en cada parcela (Figura 2.1). De cada árbol seleccionado se extrajo una muestra de madera (viruta) a una altura de 80 cm sobre el nivel de suelo, perpendicular a la pendiente, con la ayuda de un taladro de Pressler de 5 mm de diámetro, en la primavera de 2018 (el último anillo de la muestra se formó en 2017). También se registraron los datos dasométricos de los individuos muestreados. Las muestras se transportaron en popotes como protección y para evitar su fragmentación. Se almacenaron en un ambiente fresco y después se montaron en bases de madera. Una vez montadas, las muestras se pulieron con diferentes texturas de lija (grano 60 a la 1200) para una visualización más detallada de los anillos de crecimiento.

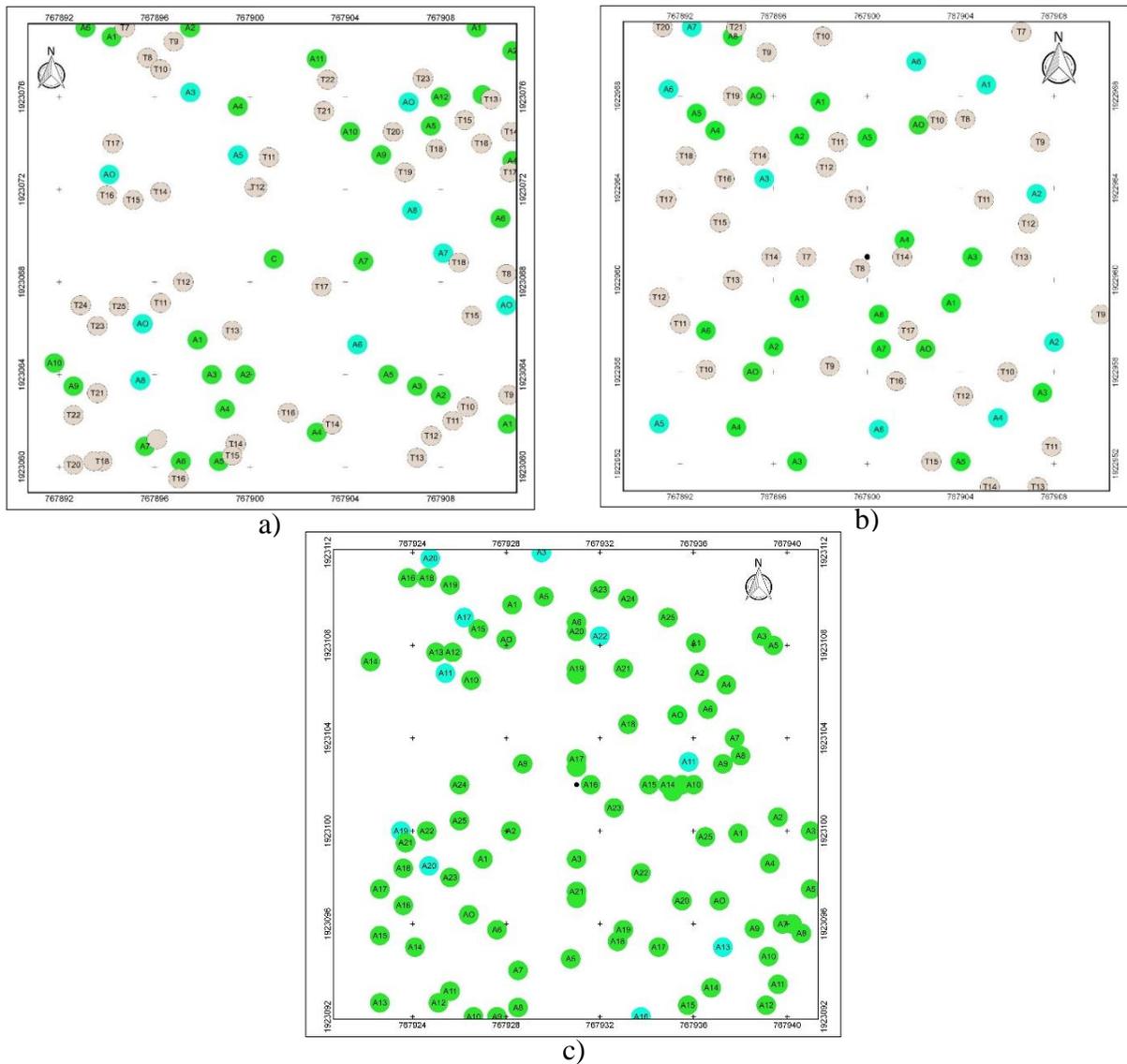


Figura 2.1 Distribución de los árboles en las parcelas de las plantación de 1995; a) Parcela 1, con aclareo ligero; b) Parcela 2, con aclareo moderado; c) Parcela 3, sin aclareo. Los puntos verdes = árboles en pie no muestreados, puntos azules = árboles en pie muestreados y puntos grises = tocones.

2.4.3 Medición de árboles vecinos

Al momento del muestreo en campo se midieron los cuatro árboles vecinos más cercanos a cada uno de los individuos muestreados para estimar el índice de competencia individual y por parcela. Para esto, posicionados en el árbol muestreado, se establecieron cuadrantes de acuerdo a la

orientación cardinal (N, E, S, y O). En cada cuadrante se identificó el árbol más cercano, al cual se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total y la distancia al árbol muestra. Con estos datos se calculó el índice de competencia (IC_i) para cada árbol muestreado, con la formula siguiente:

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

Donde, DN_j = diámetro del árbol vecino; d_{ij} = distancia del árbol objetivo al vecino. Con los valores de IC_i se calculó el índice de competencia promedio por parcela para los diez árboles muestreados en cada una de ellas.

2.4.4 Procesamiento de muestras en laboratorio

Las muestras de madera fueron escaneadas y las imágenes obtenidas se procesaron con el software winDENDRO^{TN} 2008. En cada imagen, previamente identificada, se contaron los anillos de crecimiento, tomando como referencia el anillo formado en el año 2017. Una vez identificado el año de formación de cada anillo, se midió la anchura del anillo (AA) y la anchura de la sección de madera temprana (ATE) y madera tardía (ATA) en cada uno de ellos. Con estos datos se obtuvo la proporción de madera tardía (PT), de la forma siguiente:

$$PT = (ATA * 100) / AA.$$

Con los datos de anchura de anillo se determinó el incremento en área basal por año. Para ello, se generó el crecimiento acumulado en diámetro y área basal, y por diferencia con respecto al valor del año previo se obtuvo el incremento anual en área basal.

2.4.5 Análisis estadístico de los datos

Se realizó un análisis de varianza con el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS, versión 9.3 (SAS Institute, 2004), incluyendo como co-variable en el modelo el índice de competencia estimado para cada árbol muestreado, sin obtener resultados significativos. Por lo tanto, se descartó este procedimiento y se realizó un nuevo análisis utilizando valores relativos de las características de los anillos. Los valores relativos se obtuvieron ajustando los valores originales de las variables, con base en el valor promedio de la característica en cada árbol y parcela, con el propósito de reducir el efecto de las diferencias en la velocidad de crecimiento o tamaño entre árboles dentro de una misma parcela. El uso de los valores relativos permite

identificar en cada árbol los anillos con valores menores y mayores al promedio y ajustar los datos por las diferencias de tamaño y crecimiento entre ellos. La ecuación utilizada para obtener los valores relativos fue:

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

Dónde: X_{ijr} = Valor relativo de la característica en el i-ésimo anillo del j-ésimo árbol; X_{ij} = Valor absoluto de la característica en el i-ésimo anillo del j-ésimo árbol; \bar{X}_j = Valor promedio del j-ésimo árbol; \bar{X} = Valor promedio de la parcela.

Para comparar el crecimiento radial de los árboles entre las plantaciones y su relación con las condiciones ambientales (temperatura y precipitación) en los años de formación de los anillos (objetivos b y c), se utilizó el siguiente procedimiento: primero se eliminó el efecto de la edad cambial sobre AA y ATE, utilizando un modelo de regresión exponencial negativo para ajustar estas variables con respecto a la edad del cambium. Posteriormente, a los residuales de este modelo de regresión se les sumó el valor medio de la variable en la plantación, para regresar los valores a la escala original. Con los valores ajustados de AA y ATE, se estimó, por diferencia, ATA, así como PT en cada anillo. Con los valores ajustados se realizó un análisis de varianza para evaluar las diferencias entre plantaciones en las características de los anillos de crecimiento formados en los años de 2008 a 2017, usando el procedimiento MIXED de SAS (SAS Institute, 2004).

Para evaluar la relación de las características de los anillos de crecimiento anual con la temperatura y precipitación durante los años de formación de la madera, se realizó un análisis de correlación entre las variables AA, ATE y ATA con las variables de temperatura media anual (T_{MA}), temperatura máxima promedio (T_{MAP}), temperatura mínima promedio (T_{MP}) y precipitación anual (P_A) estimadas para cada uno de los sitios donde se establecieron las plantaciones en estudio. Los datos climáticos se estimaron con base en el modelo del software "Climate NA v5.00", desarrollado por Wang *et al.* (2016). En el análisis de correlación se utilizaron las series de tiempo 1999-2016 para la plantación de 1995 y 2009-2016 para la plantación de 2005, ya que los datos climáticos solo se pudieron estimar hasta el año de 2016. Estas series de tiempo incluyen todos los anillos de crecimiento disponibles en las muestras de las dos plantaciones.

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1 Efecto del espacio de crecimiento en las características de los anillos

El análisis de varianza con los valores relativos permitió detectar un mayor número de variables con diferencias significativas ($P \leq 0.10$) entre las parcelas muestreadas en las dos plantaciones (Cuadro 2.2). En la plantación de 1995 solo se encontraron diferencias en IAB en 2011, en ATA en 2006 y 2008, y en PT en 2008. En cambio, en la plantación de 2005 hubo diferencias en AA en el periodo 2010-2013 y en 2015; en IAB en el periodo 2011-2017, en ATE en 2010-2011, 2013 y 2015; en ATA en 2012, 2014 y 2016-2017; y en PT en 2009, 2014 y 2016 (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de los anillos de crecimiento de los árboles en parcelas aclareadas y testigo en plantaciones de *Pinus patula*.

Año de formación	Plantación 1995					Plantación 2005				
	AA	IAB	ATE	ATA	PT	AA	IAB	ATE	ATA	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

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 árboles de las parcelas estudiadas en ambas plantaciones mostraron un patrón similar de comportamiento en las características de los anillos (Figura 2.2). En la plantación de 1995, las tres

parcelas evaluadas siguieron el mismo comportamiento en los primeros años de vida del árbol; AA y ATE presentaron valores elevados en los primeros años de crecimiento, pero después de 3-4 años disminuyeron de manera gradual y en los últimos años se estabilizaron con valores promedio muy bajos (Figura 2.2a y 2.2c). IAB aumentó rápidamente en los primeros años, alcanzó su punto máximo a los ocho años y posteriormente declinó gradualmente (Figura 2.2b). ATA mostró un comportamiento más variable, con aumentos y reducciones en los primeros 10 años y posteriormente una reducción gradual ligera en los últimos 10 años (Figura 2.2d). Mientras tanto, PT mostró una tendencia de aumento gradual con la edad de los árboles en las tres parcelas (Figura 2.2e); ésta fue la única característica que mostró una respuesta significativa al aclareo realizado en 2016, con una mayor PT en la parcela con mayor espacio de crecimiento en los árboles (Cuadro 2.2, Figura 2.2e).

En la plantación de 2005, la tendencia en AA y ATE fue similar, con un aumento en los primeros 4-5 años y posteriormente una reducción gradual, aunque la reducción es mayor en ATE que en AA (Figura 2.2f y 2.2h). IAB mostró un aumento gradual rápido en los primeros 7 años y luego empezó a reducirse en los últimos dos años (Figura 2.2g). ATA presentó variaciones durante los años evaluados, sin una tendencia definida (Figura 2.2i), mientras que PT presentó un incremento gradual en estos primeros nueve años de crecimiento (Figura 2.2j). Sin embargo, a diferencia de la plantación de 1995, las diferencias encontradas entre las parcelas de esta plantación fueron mayores, a favor de las parcelas aclareadas, especialmente en la Parcela 2, con mayor espacio de crecimiento (Figura 2.2).

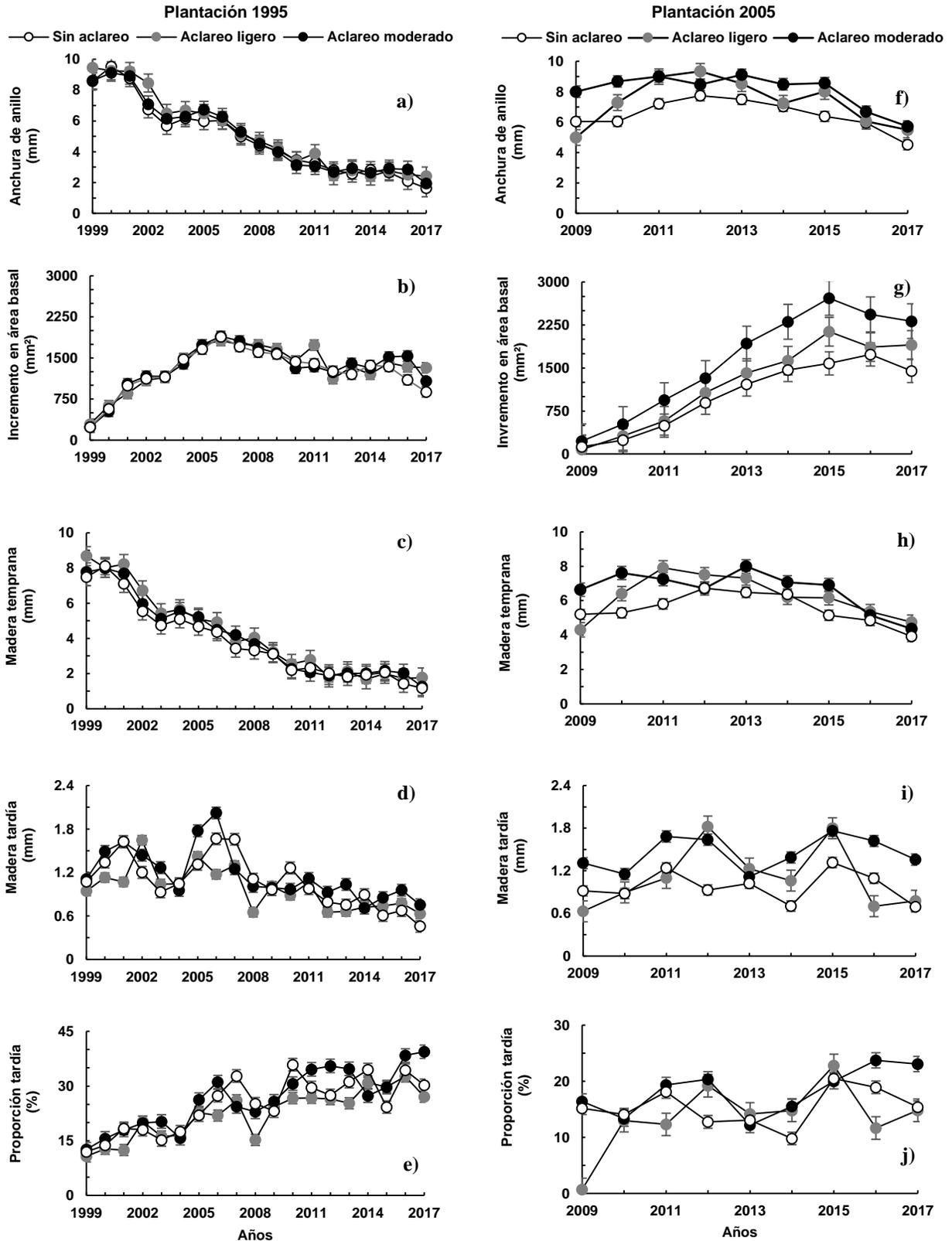


Figura 2.2 Comportamiento de las características de los anillos de crecimiento en las parcelas aclareadas y sin aclareo en dos plantaciones de *Pinus patula* de diferente edad.

El espaciamiento inicial y el pre-aclareo comercial se consideran como las herramientas más efectivas para el control del crecimiento del árbol y la calidad de la madera. El espaciamiento entre árboles es el factor más importante en la productividad del sitio, debido a su influencia en la competencia entre los mismos, en la tasa de crecimiento y el cierre del dosel (Guerra-Bugueño *et al.*, 2014; Tong y Zhang, 2005). Sin embargo, el índice de competencia promedio fue similar entre las parcelas aclareadas, a diferencia de las parcelas sin aclareo, que expresaron un valor promedio de IC mayor en ambas plantaciones ($IC_{1995} = 0.30, 0.33$ y 0.39 e $IC_{2005} = 0.20, 0.20$ y 0.28), no obstante, estas diferencias no son notorias en las características de los anillos de crecimiento, especialmente en la plantación de mayor edad.

Estudios realizados por Auty *et al.* (2018); Latham y Tappeiner (2002), en cuanto a la densidad de plantación, indican que la reducción de la competencia induce a un aumento en el crecimiento individual del árbol. A su vez, un crecimiento acelerado se manifiesta en un mayor número de células de madera temprana y menor formación de madera tardía (Koga *et al.*, 2002). Por su parte, Hébert *et al.* (2016), mencionan que especies de rápido crecimiento suelen producir un mayor porcentaje de madera temprana. En ese sentido, se esperaba encontrar un aumento importante en el crecimiento en las parcelas aclareadas con respecto a la parcela testigo, sin aclarear. Aunque, las parcelas aclareadas en la plantación de 1995 mostraron anillos de crecimiento muy estrechos en los últimos años, con un aumento gradual en la proporción de madera tardía y sin diferencias significativas con los árboles en la parcela sin aclareo, excepto en el último año. Es importante reconocer, a pesar de que los individuos en las parcelas aclareadas tenían mayor espaciamiento promedio, también tenían un mayor tamaño en diámetro y una mayor área basal por ha, por lo que en realidad estuvieron sometidos a niveles similares de competencia por espacio (Arenas-Castro *et al.*, 2015).

Por otra parte, los individuos en las parcelas de la plantación de 2005 mostraron mayor crecimiento con respecto a los de la parcela testigo, aun cuando este crecimiento se manifiesta desde los primeros años de formación. En especial, los árboles con mayor espacio de crecimiento (menor número de árboles) reflejan mayor crecimiento. De acuerdo con los datos dasométricos registrados después del aclareo aplicado en 2016, la Parcela 2 presenta una densidad de 700 árboles ha^{-1} , con un diámetro normal de 16.85 cm (Cuadro 1.1), mientras las Parcelas 1 y 3 presentan mayor número de árboles por hectárea, y, por consiguiente, menor diámetro normal promedio. A

su vez, la Parcela 2 alcanzó un área basal mayor en 5.03 y 8.1 m² ha⁻¹ con respecto al área basal de las Parcelas 1 y 3, respectivamente (Cuadro 1.1).

El crecimiento de un árbol tiene la función de adquirir y mejorar la eficiencia del uso de los recursos para generar fotosintatos y usarlos en diversos tejidos y funciones en el árbol (Binkley, 2004). Según Akers *et al.*, (2013), la limitación de la luz tiene mayor influencia en el crecimiento de los árboles que la limitación de los recursos del suelo, esto se observa en la tendencia del crecimiento radial de los individuos de la Parcela 2. Al parecer, aun cuando las tres parcelas se establecieron con la misma densidad de plantación (1600 árboles ha⁻¹), la Parcela 2 presentó una mayor mortalidad inicial. Esta situación ocasionó mayor espaciamiento entre los árboles que sobrevivieron en esa parcela, favoreciendo su crecimiento radial.

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

Las características de los anillos de crecimiento de los árboles mostraron diferencias ($P \leq 0.10$) entre las dos plantaciones en los primeros años en común (Cuadro 2.3). Los efectos fueron más notorios en AA y ATE durante los años 2009-2010 y 2012-2015. En el caso de ATA, solo se encontraron diferencias en 2010 y 2015, mientras que para PT hay diferencias importantes en varios años, al inicio y al final de la serie de tiempo en común (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3 Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de los anillos de crecimiento ajustados por edad cambial entre los árboles de las dos plantaciones de *Pinus patula*.

Año de formación	AA	ATE	ATA	PT
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

AA = anchura de anillo, ATE = anchura de madera temprana, ATA = anchura de madera tardía, PT = proporción de madera tardía.

Sin embargo, el comportamiento de las características de los anillos en los árboles de las dos plantaciones fue diferente durante los años 2009-2017 (Figura 2.3). En los primeros años (2009-2010), los individuos de la plantación de 1995 desarrollaron anillos de crecimiento más anchos y con mayor cantidad de madera temprana, que los de la plantación de 2005, mientras que en 2012-2015 se observó un comportamiento opuesto, ya que en este periodo, los individuos de la plantación de 2005 presentaron en promedio, anillos de crecimiento más amplios y con mayor cantidad de madera temprana (Figura 2.3).

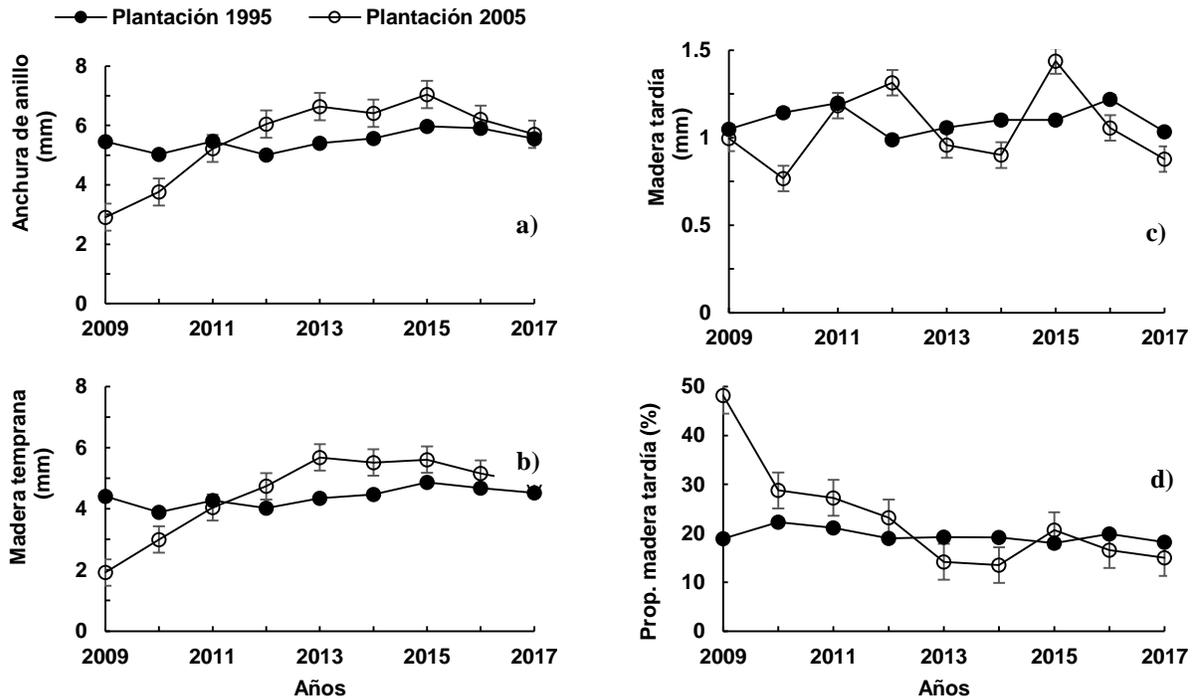


Figura 2.3 Comparación de las características promedio de los anillos de crecimiento en las plantaciones de *Pinus patula* de diferente edad, después de eliminar el efecto de la edad cambial.

El comportamiento distinto de las características de los anillos de los individuos en las dos plantaciones se relaciona con un aumento gradual en la anchura de los anillos en la plantación joven, mientras que, en la plantación de mayor edad, la anchura es relativamente estable durante los años 2009-2017 (Figura 2.3). Al parecer, la recesión de la copa en la plantación de mayor edad, debido a la competencia excesiva entre los árboles redujo la capacidad de respuesta de las características de los anillos. Aunque para este estudio se seleccionaron los individuos con un nivel

de competencia promedio existente en cada parcela mediante el plano de distribución espacial (Figura 2.1), el nivel de competencia fue similar entre las parcelas de una misma plantación pero difirió entre las dos plantaciones. La competencia fue más intensa en la plantación de 1995 (IC promedio = 0.346 ± 0.07) que en la de 2005 (IC promedio = 0.225 ± 0.07), debido a las diferencias en el espaciamiento inicial. De esta manera, al inicio del periodo de comparación (en 2009) la plantación de 1995 tenía una densidad promedio de 2358 árboles por ha con un área basal promedio de $47.09 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, mientras que la plantación de 2005 tenía 1300 árboles por ha en promedio, con un área basal promedio menor de $19.06 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$.

La intersección entre las plantaciones mostró un mayor crecimiento a favor de la plantación más joven, y esas diferencias se atribuyen al espaciamiento entre los árboles y al tamaño y posición de la copa viva (Domínguez-Domínguez *et al.*, 2006). La longitud de la copa viva está determinada en gran medida por el espacio entre los mismos (Castelán-Lorenzo y Arteaga-Martínez, 2009; Gartner *et al.*, 2002). Por otro lado, parece que las diferencias en crecimiento radial no se deben a diferencias en productividad del sitio, ya que las dos plantaciones presentan índices de sitio similares ($IS_{1995}=33 \text{ m}$ e $IS_{2005}=29 \text{ m}$), estimados mediante la ecuación ajustada por Santiago-García *et al.* (2017), en rodales de *Pinus patula* para la misma zona de estudio, considerando una edad base de 40 años. En este caso, para los sitios de las plantaciones se utilizó la altura dominante registrada en 2018 y la edad de cada plantación en ese año (12 y 22 años). Además, se estimó el índice de aridez de MARTONNE (1926), sin embargo, ambos sitios presentan índices similares ($IA_{1995} = 67$ e $IA_{2005} = 53$), esto es complemento a la productividad del sitio.

La variación observada entre las características de los anillos de crecimiento de los árboles de ambas plantaciones se atribuye a las condiciones ambientales en las que crece el árbol, que influyen de manera significativa en la variación de estas características dentro de los mismos (Schimleck *et al.*, 2018). De acuerdo con Baldwin *et al.* (2000), a mayor espaciamiento inicial, los individuos desarrollan mayor diámetro y longitud de copa, esto favorece la elongación de las células, se forman anillos más amplios y mayor cantidad de madera temprana. Por el contrario, como lo reportan Beckwith y Shackelford (1976), árboles que presentan un crecimiento bajo de la copa o una recesión temprana de la copa, de acuerdo a lo observado en la plantación de 1995, se forman anillos angostos y alto porcentaje de madera tardía. Rodríguez-Ortíz (2010), recomienda para

Pinus patula un espaciamiento inicial de entre 2.40 a 2.75 m, puesto que es una especie sensible a la competencia en sus primeros años de vida.

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

Las características de los anillos de crecimiento (AA, ATE y ATA) en la plantación de 1995 mostraron una correlación significativa ($P < 0.10$) y positiva únicamente con T_{MIP} (Cuadro 2.4). En la plantación de 2005, solo ATA mostró una correlación significativa con T_{MA} y con P_A , pero la correlación fue positiva con la primera y negativa con la segunda (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4 Coeficiente de correlación de Pearson entre las características de los anillos de crecimiento y las condiciones climáticas en dos plantaciones de *Pinus patula* ($n_{1995} = 18$; $n_{2005} = 8$).

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

Significancia del coeficiente de correlación: * $P \leq 0.10$. 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.

Las correlaciones positivas de AA, ATE y ATA con la temperatura mínima promedio anual en la plantación de 1995 indican que un aumento en la temperatura mínima induce un aumento en el crecimiento radial (Figura 2.4a, b y c). Sin embargo, en la plantación de 2005 esta relación positiva entre temperatura y crecimiento radial solo se observó para ATA (Figura 2.4d). En tanto que, la correlación negativa entre ATA y la precipitación media anual detectada en la plantación de 2005 indica que en años más húmedos se presentó una menor formación de madera tardía (Figura 2.4e).

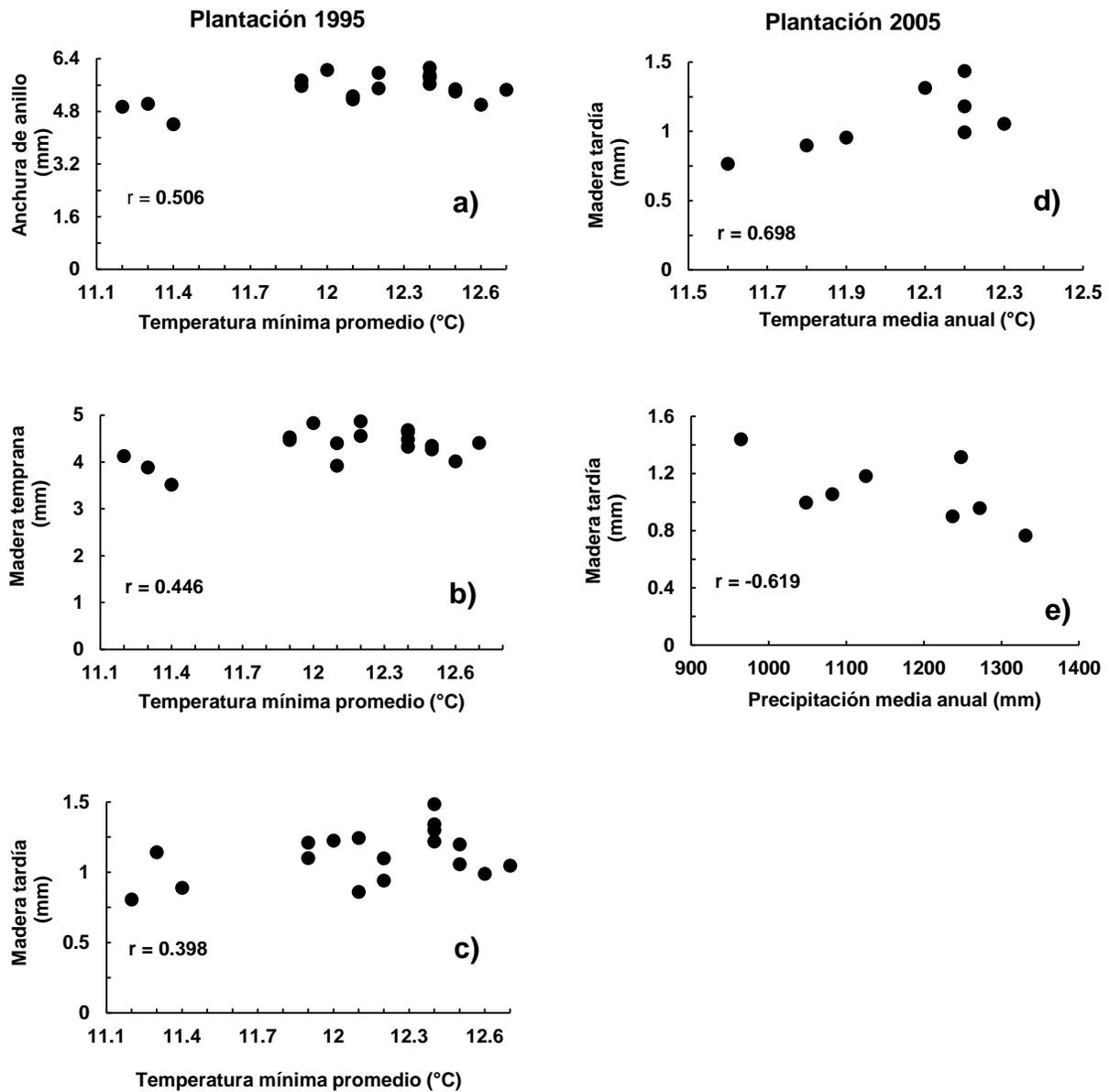


Figura 2.4 Correlación entre la AA, ATE y ATA con la TMIP, TMA, y PMA en plantaciones de *Pinus patula* (Plantación 1995 = 1999 – 2016, n = 18; Plantación 2005 = 2009 – 2016, n = 8).

Los elementos climáticos de temperatura y precipitación son factores importantes en la dinámica del crecimiento radial (Chacón-de la Cruz y Pompa-García, 2015). Por ello, se esperaba una correlación positiva entre el crecimiento radial y las condiciones ambientales para ambas plantaciones. En efecto, las características de los anillos de crecimiento radial de los árboles de la

plantación de 1995 se asociaron de manera positiva con la temperatura mínima promedio. Estos resultados coinciden con el estudio realizado en torno a la dinámica de la formación de la madera de *Juniperus przewalskii* (Zhang *et al.*, 2018), así como en el caso de la variación en grosor de madera temprana y tardía en *Pinus cooperi* (Pompa-García y Camarero-Martínez, 2015).

No obstante, la relación negativa encontrada entre ATA y P_A en la plantación de 2005 es un tanto inesperada, puesto que estudios realizados en otras especies generalmente han encontrado una relación positiva. Por ejemplo, Olivar *et al.* (2013) reportan una relación positiva entre el crecimiento radial en *Pinus halepensis* con la precipitación, aunque esto se debió principalmente a la asociación de la formación de la madera tardía con la precipitación de invierno. Por su parte, Lebourgeois (2000) encontró para *Pinus nigra* una relación positiva ($r = 0.46$) entre la anchura de madera tardía y la precipitación media mensual.

Debido a la fisiología compleja en la actividad del cambium durante la formación de la madera de los árboles, es común esperar una respuesta también compleja en su relación con las condiciones climáticas (Żywiec *et al.*, 2016). Por ejemplo, es posible que una mayor precipitación a mediados de la temporada de crecimiento promueva una mayor actividad del follaje y del cambium, favoreciendo la formación de células de madera temprana y prolongando el periodo de transición a la formación de células de madera tardía. Se ha demostrado en estudios previos que la transición de madera temprana a madera tardía está asociada con el cese del crecimiento apical (Larson, 1969). La formación de células de madera temprana favorece una alta conductividad hidráulica (Cruickshank y Filipescu, 2017). Mientras que, una menor precipitación a mediados del periodo de crecimiento pudo ocasionar una transición más rápida a la formación de madera tardía, como parte de la respuesta al estrés hídrico y la necesidad de reducir la vulnerabilidad hidráulica (Wilkinson *et al.*, 2015; Abe *et al.*, 2003; Domec y Gartner, 2002). De acuerdo con los datos de la estación meteorológica 20041, ubicada en el municipio de Ixtlán de Juárez, en la última década la precipitación se concentró entre los meses de mayo a septiembre (CONAGUA, 2018). En resumen, la temperatura y precipitación tienen una relación relativamente compleja con las características de los anillos de crecimiento por su efecto sobre la velocidad y duración de la división cambial, y la transición de madera temprana a madera tardía en las especies leñosas (Rossi *et al.*, 2012).

2.6 CONCLUSIÓN

El crecimiento radial de los árboles de las plantaciones expresó una tendencia similar entre las parcelas aclareadas y sin aclareo. En la plantación de 1995, las parcelas aclareadas no se diferenciaron de la parcela sin aclareo durante los años 1999-2017, a pesar de las diferencias en espaciamiento entre ellos, estuvieron expuestas a niveles similares de competencia entre ellos, debido a su mayor tamaño promedio. En la plantación de 2005 se expresaron diferencias en la amplitud de los anillos a favor de las parcelas aclareadas, especialmente en la parcela con menor número de individuos, en consecuencia a las diferencias en la supervivencia inicial de los árboles en esas parcelas.

En las características de los anillos de crecimiento de los árboles en las dos plantaciones se encontraron diferencias en 2009-2010 en la plantación de 1995 con anillos más amplios y mayor cantidad de madera temprana, de 2012-2015 en la plantación 2005 con anillos de crecimiento más amplios y mayor cantidad de madera temprana. Estas diferencias se deben principalmente a las diferencias en el nivel de competencia entre las plantaciones, originadas por el diferente espaciamiento inicial utilizado en ellas.

Las variables AA, ATE y ATA mostraron una relación positiva con la T_{MIP} en la plantación 1995; mientras que la plantación de 2005 la ATA se relacionó de manera positiva con la T_{MA} y negativa con la P_{MA} . Por lo tanto, la temperatura genera un efecto positivo sobre la formación de la madera, así como en el tamaño y forma de las células, mientras la precipitación tiene un efecto más complejo sobre las características de los anillos de crecimiento, por su efecto sobre la transición de madera temprana a tardía.

CONCLUSIONES GENERALES

De acuerdo con los resultados expuestos en este trabajo, los aclareos aplicados en 2004 y 2008 en la plantación de *Pinus patula* establecida en 1995 ocasionaron un impacto reducido en el crecimiento radial de los árboles y en las características de los anillos anuales de crecimiento, especialmente en la sección basal del fuste. Los anillos de crecimiento expresaron una reducción drástica en los años previos a la aplicación del primer aclareo y a pesar de que el segundo aclareo fue más intensivo, no fue posible revertir la tendencia en el crecimiento de los anillos anuales. En cambio, la mayor anchura de los anillos y sus componentes en la parte intermedia y superior del fuste ocasionaron una reducción gradual en la conicidad del fuste. El espaciamiento reducido utilizado al establecer la plantación ocasionó una competencia elevada y una recesión prematura de la copa y los aclareos se aplicaron demasiado tarde y en forma muy ligera.

El crecimiento radial en las dos plantaciones de diferente edad mostró una tendencia similar en las parcelas aclareadas y sin aclareo, a pesar de que se seleccionaron individuos con nivel de competencia promedio. En la plantación de 1995, los árboles en las parcelas aclareadas no se diferenciaron de los de la parcela sin aclareo durante los años 1999-2017, dado que estuvieron expuestas a un nivel similar de competencia considerando las diferencias en el tamaño promedio de los árboles entre ellas. Por el contrario, la plantación establecida en 2005 los individuos en las parcelas aclareadas en 2016 mostraron una mayor amplitud de los anillos en los años previos al aclareo, debido fundamentalmente a un menor número de árboles derivado de diferencias en la supervivencia inicial, lo cual favoreció un mayor crecimiento radial.

Algunas características de los anillos anuales presentaron una alta asociación con las condiciones climáticas que pueden favorecer o afectar la transición de madera temprana a tardía y reflejarse en la amplitud de los anillos anuales. La anchura del anillo, así como de la madera temprana y madera tardía mostraron una relación positiva con la temperatura mínima promedio anual en la plantación de 1995. En cambio, en la plantación de 2005 sólo la anchura de madera tardía la ATA se asoció de manera positiva con la temperatura media anual y en forma negativa con la precipitación anual.

LITERATURA CITADA

- Abe H., T. Nakai, Y. Utsumi & A. Kagawa. 2003. Temporal water deficit and wood formation in *Cryptomeria japonica*. *Tree Physiology* 23: 859–863.
- Akers M. K., M. Kane, D. Zhao, R. O. Teskey & R. F. Daniels. 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.
- Álvarez-Taboada M. F., M. Barrio-Anta, J. Gorgoso-Varela & J. G. Álvarez-González. 2003. Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. *Investigación agraria. Sistema y Recursos Forestales* 12: 25–35.
- Arenas-Castro S., J. Fernández-Haeger & D. Jordano-Barbudo. 2015. Estructura de edades, tamaños y crecimiento en una población local de Piruétano (Córdoba, España). *Ecosistemas* 24: 7–14.
- Auty D., J. Moore, A. Achim, A. Lyon, S. Mochan & B. Gardiner. 2018. Effects of early respacing on the density and microfibril angle of sitka spruce wood. *Forestry: an International Journal of Forest Research* 91: 307–319.
- Balducci L., A. Deslauriers, A. Giovannelli, S. Rossi & 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.
- Baldwin V. C., K. D. Peterson, A. Clark III, R. B. Ferguson, M. R. Strub & D. R. Bower. 2000. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old loblolly pine. *Forest Ecology and Management* 137: 91–102.
- Bernal-Salazar S. & T. T. Salgado. 2000. Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 6: 73–86.
- Bermejo V. B. & J. B. Pontones. 1999. Los pinos mexicanos y su utilización como especies introducidas de alto potencial en varios países del mundo. In *Segundo Simposio Sobre Avances en la Producción de Semillas Forestales en América Latina*. CATIE 18: 249-253.
- Bendtsen B. A. 1978. Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal* 28: 61-72.
- Binkley D. 2004. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. *Forest Ecology and Management* 190: 265–271.
- Bodner J. 1983. Effect of thinning and fertilization on wood properties and intra-ring

- characteristics in young Douglas-fir. M. S. Thesis, Oregon State University. Department of Forest Products. Corvallis. 144 p.
- Burschel P. 1974. Die durchforstung in heutiger Sicht. Forstarchiv 45 2: 21-28.
- Camarero J. J., J. Guerrero & E. Gutiérrez. 1997. Formación del anillo de crecimiento y clima: un ejemplo de modelos para *Pinus uncinata* Ram. y *Pinus sylvestris* L. en los Pirineos Centrales. Ecología 11: 235–254.
- Castelán-Lorenzo M. & B. Arteaga-Martínez. 2009. Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en corrtas bajo el método de árboles padres. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 15: 49–57.
- Chacón-de la Cruz J. E. & M. Pompa-García. 2015. Response of tree radial growth to evaporation, as indicated by earlywood and latewood. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente 21: 57–65.
- Cown D. J. 1972. Effects of severe thinning and pruning treatments on the intrinsic wood properties of young Radiata pine. New Zealand Journal of Forestry Science 3: 379–389.
- CONAGUA. 2018. Estaciones climatológicas. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx>.
- Cruickshank M. G. & C. N. Filipescu. 2017. The interactive effect of root disease and climate on wood properties in halfsibling Douglas-fir families. Forest Ecology and Management 392: 58–67.
- Dvorak W. S., Hodge, G. R. Kietzka, J. E. Malan, F. Osorio, L. F. & Stanger, T. K. 2000. *Pinus patula*. In: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative. Raleigh, NC. USA. 148- 173.
- Domec J. C. & B. L. Gartner. 2002. How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood?. Journal of Experimental Botany 53: 2369–2379.
- Domínguez-Domínguez M., F. Bravo & M. del Río. 2006. Modelo del tamaño de copa de pinus sylvestris l. en bosque del centro de España. Interciencia 31: 168–75.
- Fabris S. 2000. Influence of cambial ageing, initial spacing, stem taper and growth rate on the wood quality of three coastal conifers. Doctoral Thesis. British Columbia Vancouver, Canada. 250 p.
- Fernández M. P., J. Basauri, C. Madariaga, M. Menéndez-Miguélez, R. Olea & A. Zubizarreta-Gerendiani. 2017. Effects of thinning and pruning on stem and crown characteristics of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). iForest 10: 383–390.

- Ferrere P., A. M. Lupi & T. Boca. 2015. Crecimiento del *Pinus radiata* sometido a diferentes tratamientos de raleo y poda en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Bosque* 36: 423–434.
- Fujimori T. 2001. *Ecological and Silvicultural Strategies for Sustainable Forest Management*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science. 373 p.
- Franceschini T., V. Gauthray-Guyénet, R. Schneider, J. C. Ruel, D. Pothier & A. Achim. 2017. Effect of thinning on the relationship between mean ring density and climate in Black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.). *Forestry* 00: 366–381.
- García-Suárez A. M., C. J. Butler & M. G L Baillie. 2009. Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: a multi-species approach. *Dendrochronologia* 27: 183–198.
- Gartner B. L., E. M. North, G. R. Jonson & R. Singleton. 2002. Effects of live crown on vertical patterns of wood density and growth in Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 439–447.
- Goche-Télles R., A. Velázquez-Martínez, A. Borja-de la Rosa, T. Terrazas, C. Cervantes-Martínez & A. Trinidad-Santos. 2003. Densidad básica y ancho de anillos de la madera de *Pinus patula* antes y después de un aclareo. *Interciencia* 28: 705–709.
- Gruber A., S. Strobl, B. Veit & W. Oberhuber. 2010. Impact of drought on the temporal dynamics of wood formation in *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology* 30: 490–501.
- Guerra-Bugueño E., F. Célis-Mosqueira & N. Moreno-García. 2014. Efecto de la densidad de plantación en la rentabilidad de plantaciones de *Eucalyptus globulus*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20: 21–31.
- Haghshenas M., M. R. M. Mohadjer, P. Attarod, K. Pourtahmasi, J. Feldhaus & S. M. M. Sadeghi. 2016. Climate effect on tree-ring widths of *Fagus orientalis* in the Caspian forests, northern Iran. *Forest Science and Technology* 12: 176–182.
- Hébert F., C. Krause, P. Pierre-Yves, A. Achim, G. Prigent & J. Ménétrier. 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: 1–16.
- Hernández L. & H. Castellanos. 2006. Crecimiento diamétrico arbóreo en bosques de sierra de Lema, Guayana Venezolana: primeras evaluaciones. *Interciencia* 31: 779–786.
- Hernández L. A., R. M. Martínez, J. J. Vargas H., A. Velázquez M. & G. Ángeles P. 1996. Características de los anillos y densidad de la madera a diferentes alturas del fuste en rodales

- aclareados de *Pinus patula* Schl. et Cham. Revista Ciencia Forestal en México. 21: 39-55.
- Koga S., K. Oda, J. Tsutsumi & T. Fujimoto. 1997. Effect of thinning on the wood structure in annual growth rings of Japanese larch (*Larix leptolepis*). IAWA Journal 18: 281–290.
- Koga S., S. Y. Zhang & J Bégin. 2002. Effects of precommercial thinning on annual radial growth and wood density in Balsam fir (*Abies balsamea*). Wood Fiber Science 34: 625–642.
- Larson P. R. 1969. Wood formation and the concept of wood quality. Bulletin no. 74. New Haven, CT: Yale University School of Forestry. 54 p.
- Larson P. R., D. E. Kretschmann, A. III Clark & J. G. Isebrands. 2001. Formation and properties of juvenile wood in southern pines. A synopsis. Gen.Tech. Rep. FPL-GTR-129. Forest Service 42 p.
- Latham P. & J. Tappeiner. 2002. Response of old-growth conifers to reduction in stand density in western Oregon forests. Tree Physiology 22: 137–146.
- Lebourgeois F. 2000. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of corsican pine from western France. Annals of Forest Science 57: 155–164.
- Mauriat M., G. Le Provost, P. Rozenberg, S. Delzon, N. Bréda, B. Clair, C. Coutand, J.-C. Domec, T. Fourcaud, J. Grima-Pettenati, R. Herrera, J.-C. Leplé, N. Richet, J.-F. Trontin & C. Plomion. 2014. Wood formation in trees. In: Ramawat, K.G., J.-M. Mérillon, M. R. Ahuja, (Eds.). Tree Biotechnology. CRC Press, Boca Raton, USA. 56-111.
- Macdonald E. & J. Hubert. 2002. A review of the effects of silviculture on wood quality. Forestry 75: 107–138.
- McKeand S., T. Mullin, T. Byram & T. White. 2003. Deployment of genetically improved Loblolly and Slash pines in the south. Journal of Forestry 101: 32–37.
- Olano J. M., M. Eugenio, A. I. García-Cervigón, M. Folch & V. Rozas. 2012. Quantitative tracheid anatomy reveals a complex environmental control of wood structure in continental mediterranean climate. International Journal Planta Sciences 173: 137–149.
- Olivar J., S. Bogino, H. Spiecker & F. Bravo. 2012. Climate impact on growth dynamic and intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes. Dendrochronologia 30: 35–47.
- Olivar J., C. B. K. Rathgeber, C. Ordoñez & F Bravo. 2013. Influencia del clima en la densidad de la madera de pinos mediterráneos (*Pinus halepensis* y *Pinus pinaster*). 6º Congreso Forestal Español 13 p.

- Pamerleau-Couture É., C. Krause, D. Pothier & A. Weiskittel. 2015. Effect of three partial cutting practices on stand structure and growth of residual Black spruce trees in north-eastern Quebec. *Forestry* 88: 471–483.
- Pape R. 1999. Effects of thinning regime on the wood properties and stem quality of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14: 38–50.
- Pinkard, E. A. & C. L. Beadle. 2000. A physiological approach to pruning. *International Forestry Review* 2: 295–305.
- Plomion C., G. Leprovost & A. Stokes. 2001. Wood formation in trees wood formation in trees. *Plant Physiology* 127: 1513–1523.
- Pompa-García M. & J. J. Camarero-Martínez. 2015. Potencial dendroclimático de la madera temprana y tardía de *Pinus cooperi* Blanco. *Agrociencia* 49: 177–187.
- Puettmann K. J., K. D. Coates & C. Messier. 2016. Crítica de la Silvicultura. El Manejo de la Complejidad. In Vargas-Larreta B. & C. G. Aguirre-Calderón (trads.). ACCI. Madrid. España. 294 p.
- Rodríguez-Ortíz G. 2010. Efecto de aclareos en el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schl. et Cham. en Ixtlán, Oaxaca. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, Estado de México, México. 134 p.
- Rodríguez-Ortíz G., V. A. González-Hernández, A. Aldrete, H. M. de los Santos-Posada, A. Gómez-Guerrero & A. M. Fierros-González. 2011a. Modelos para estimar el crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34: 205–212.
- Rodríguez-Ortíz G., A. Aldrete, V. A. González-Hernández, H. M. de los Santos-Posadas, A. Gómez-Guerrero & A. M. Fierros-González. 2011b. ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*?. *Agrociencia* 45: 719–732.
- Rodríguez-Ortíz G., H. M. de los Santos-Posadas, V. A. González-Hernández, A. Aldrete, A. Gómez-Guerrero & A. M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18: 25–41.
- Rossi S., H. Morin & A. Deslauriers. 2012. Causes and correlations in cambium phenology: towards an integrated framework of xylogenesis. *Journal of Experimental Botany* 63 : 2117–2126.
- Rozas V., I. García-González & R. Zas. 2011. Climatic control of intra-annual wood density

- fluctuations of *Pinus pinaster* in NW Spain. *Trees* 25: 443–453.
- Rozas V., C. Le Quesne & M. Rojas-Badilla. 2016. Factores climáticos que controlan el crecimiento radial y la formación de fluctuaciones de densidad en la madera de *Austrocedrus chilensis* en Valdivia, Chile. *Bosque* 37: 461–471.
- Salazar-García J. G., J. J. Vargas-Hernández, J. Jasso-Mata, J. D. Molina-Galán, C. Ramírez-Herrera & J. López-Upton. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de pinus en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5: 19–34.
- SAS Institute Inc. 2004. The SAS system for windows. Version 9.4. Cary, NC, USA.
- Sánchez-González A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera Y Bosques* 14: 107–120.
- Santiago-García W., E. Pérez-López, G. Quiñonez-Barraza, G. Rodríguez-Ortiz, E. Santiago-García, F. Ruiz-Aquino & J. C. Tamarit-Urias. 2017. A Dynamic system of growth and yield equations for *Pinus patula*. *Forests* 8:1–13.
- Schimleck L., F. Antony, J. Dahlen & J. Moore. 2018. Wood and fiber quality of plantation-grown conifers: a summary of research with an emphasis on loblolly and radiata pine. *Forests* 9: 1–16.
- Swidrak I., A. Gruber, W. Kofler, and W. Oberhuber. 2011. Effects of environmental conditions on onset of xylem growth in *Pinus sylvestris* under drought. *Tree Physiology* 31: 483–493.
- Tong Q., F. Tanguay & S. Y. Zhang. 2011. Impact of commercial thinning on annual radial growth and wood density in plantation-grown black spruce. *Wood and Fiber Science* 43. 311-325.
- Tong Q. J., and S. Y. Zhang. 2005. Impact of Initial spacing and precommercial thinning on jack pine tree growth and stem quality. *Forestry Chronicle* 81: 418–428.
- Uranga-Valencia L. P., H. M. de los Santos-Posadas, J. R. Valdez-Lazalde, J. López-Upton & H. Navarro-Garza. 2015. Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque. *Agrociencia* 49: 787–801.
- Vásquez-García I., M. A. López-López, G. Pérez-Ángeles & V. M. Cetina-Álcala. 2016. Growth and increase of a *Pinus patula* plantation with fertilization and thinning treatments. *International Journal of Environmental & Agriculture Research* 2: 73–78.
- Wang T, A. Hamann, D. Spittlehouse & C. Carroll. 2016. Locally downscaled and spatially customizable climate data for historical and future periods for north America. *PLoS ONE* 11(6): e0156720.

- Wilkinson S., J. Ogée, J. C. Domec, M. Rayment & L. Wingate. 2015. Biophysical modelling of intra-ring variations in tracheid features and wood density of *Pinus pinaster* trees exposed to seasonal droughts. *Tree Physiology* 35: 305–318.
- Winck R. Á., H. E. Fassola & M. C. Área. 2015. Efecto del raleo sobre las propiedades anatómicas de la madera de *Pinus taeda*. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17: 391–406.
- Zhang J., X. Gou, N. Pederson, F. Zhang, H. Niu, S. Zhao & F. Wang. 2018. Cambial phenology in *Juniperus przewalskii* along different altitudinal gradients in a cold and arid region. *Tree Physiology* 38: 840–852.
- Zhang S Y, G. Chauret, D. E. Swift & I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 945–952.
- Zhu J. Y., C. T. Scott, K. L. Scallon & G. C. Myers. 2007. Effects of plantation density on wood density and anatomical properties of red pine (*Pinus resinosa* Ait.). *Wood and Fiber Science* 39: 502–512.
- Żywiec M., E. Muter, T. Zielonka, M. Delibes, G. Calvo & J. M. Fedriani. 2016. Long-term effect of temperature and precipitation on radial growth in a threatened thermo-mediterranean tree population. *Trees - Structure and Function* 31: 491–501.