

Radial growth of pine species in stands subject to selection cutting in Santa María Lachixío, Oaxaca, Mexico

Crecimiento radial de especies de pino en rodales sujetos a cortas de selección en Santa María Lachixío, Oaxaca, México

Héctor A. Trujillo-Martínez¹; Valentín J. Reyes-Hernández^{1*}; Armando Gómez-Guerrero¹; Ma. Amparo Borja-de la Rosa²

¹Colegio de Postgraduados, Postgrado en Ciencias Forestales. km 36.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. km 38.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: vreyes@colpos.mx; tel.: +52 595 952 0200 ext. 1490.

Abstract

Introduction: The evaluation of the effect of management activities on trees is essential to gain a better understanding of the processes occurring in the stands.

Objective: To evaluate the effect of selection cutting on the growth of pine species in uneven-aged stands.

Materials and methods: Thirty sampling sites were established in two mixed pine stands subjected to selection cutting in 2003. The stumps of this harvest were used as site centers and the growth of the residual trees was evaluated in a 10-m radius; tree-size variables and competition indices were calculated.

Results and discussion: In the first five years after the harvest, 47 % of residual trees showed significant growth ($P \leq 0.05$). Stump diameter, diameter at breast height and competition were the most important variables to explain growth. The competition area of the harvested individuals (stumps) showed influence up to a 15-m radius. The increase in basal area was 71 % with respect to pre-harvest growth. This increase was related to the basal area sum of the residual trees and 1.3 m² per site (41.3 m²·ha⁻¹) was established as the threshold from which a release is nullified by residual competition.

Conclusion: Selection cutting influences residual tree growth in a differentiated way; the response may be positive, negative or nil depending on size and local competition.

Resumen

Introducción: La evaluación del efecto de actividades de manejo sobre el arbolado es primordial para obtener un mejor conocimiento de los procesos ocurridos en los rodales.

Objetivo: Evaluar el efecto de las cortas de selección sobre el crecimiento de especies de pino en rodales incoetáneos.

Materiales y métodos: Se establecieron 30 sitios de muestreo en dos rodales mezclados de pino intervenidos con cortas de selección en el año 2003. Se utilizaron los tocones de dicho aprovechamiento como centros de sitio y se evaluó el crecimiento del arbolado residual en un radio de 10 m; se calcularon variables dasométricas e índices de competencia.

Resultados y discusión: En el primer quinquenio posterior al año de cosecha, 47 % del arbolado residual mostró crecimiento significativo ($P \leq 0.05$). El diámetro de tocón, diámetro normal y la competencia fueron las variables más importantes para explicar el crecimiento. El área de competencia de los individuos aprovechados (tocones) mostró influencia hasta un radio de 15 m. El incremento en área basal fue de 71 % con respecto al crecimiento anterior a la cosecha. Este aumento se relacionó con la suma de área basal del arbolado residual y se estableció 1.3 m² por sitio (41.3 m²·ha⁻¹) como umbral a partir del cual una liberación se nulifica por la competencia residual.

Conclusión: Las cortas de selección influyen en el crecimiento del arbolado residual de manera diferenciada; la respuesta puede ser positiva, negativa o nula en función del tamaño y de la competencia local.

Keywords: growth rings; competition indices; uneven-aged forest; increase in basal area; forest management.

Palabras clave: anillos de crecimiento; índices de competencia; bosque incoetáneo; incremento en área basal; manejo forestal.

Introduction

One of the established premises in forest management, particularly in timber harvesting, is that activities carried out in a forest stand should lead to an increase in residual trees, which is not often the case (Powers, Pregitzer, Palik, & Webster, 2009). In Mexico, of the total area under forest management, approximately 50 % was under selective methods in 2001 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2001). Unfortunately, updated data at the national level are difficult to obtain. Nevertheless, selective methods have shown deficiencies in their bases or procedures, such as the widespread application of formulas and methods without distinction between diverse ecological conditions or the assumption of an exponential growth of residual trees during the rotation (Hernández-Díaz, Corral-Rivas, Quiñonez-Chávez, Bacon-Sobbe, & Vargas-Larreta., 2008; Torres-Rojo, 2000).

Competition as a limiting factor for radial tree growth has been a topic of interest for decades (Cambrón-Sandoval, Suzán-Azpiri, Vargas-Hernández, Sánchez-Vargas, & Sáenz-Romero, 2013; Looney, D'Amato, Fraver, Palik, & Reinikainen, 2016; Tomé & Burkhart, 1989). Several authors have evaluated the thinnings applied in even-aged stands and their effects on various tree-size variables (Espinosa, García, & Valeria, 1994; Rodríguez-Ortiz et al., 2011; Kang, Shibuya, & Shin, 2014); however, few studies have delved into the evaluation of uneven-aged stands, mainly due to the complexity of the factors involved in the growth and development processes of the trees (Forget, Nolet, Doyon, Delagrangé, & Jardon, 2007).

The present work focused on evaluating the growth of residual trees in mixed and uneven-aged pine stands that have been harvested with selection methods to analyze some of the variables that influence post-harvest growth and the processes that occur as a result of silvicultural activities.

Materials and methods

The study area is located in the municipality of Santa María Lachixío in the state of Oaxaca, Mexico (Figure 1). Sampling was done in two stands dominated by the species *Pinus douglasiana* Martínez, *P. herrerae* Martínez, *P. lawsonii* Roezl ex Gordon, *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. pringlei* Shaw, and *P. pseudostrobus* Lindl. The stands were identified in the management program as II-03 with an area of 43.07 ha and as III-07 with 20.3 ha. The commercial use of the stands was carried out in 2003 with cutting intensities of 27.8 and 33.1 %, respectively. For the purposes of this study, 15 randomly-selected sampling points were established in each stand, considering an internal area of 20 m from the periphery to override

Introducción

Una de las premisas establecidas en el manejo forestal, en particular en el aprovechamiento maderable, es que las actividades realizadas en la masa forestal deben propiciar el incremento del arbolado residual, lo cual no sucede con frecuencia (Powers, Pregitzer, Palik, & Webster, 2009). En México, del total de superficie bajo manejo forestal, aproximadamente 50 % se realizaba bajo métodos selectivos en el 2001 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2001). Desafortunadamente, los datos actualizados a nivel nacional son difíciles de obtener. No obstante, los métodos selectivos han evidenciado deficiencias en sus bases o en sus procedimientos, tales como la aplicación generalizada de fórmulas y métodos sin distinción entre condiciones ecológicas diversas o la suposición del crecimiento exponencial del arbolado residual durante el turno (Hernández-Díaz, Corral-Rivas, Quiñonez-Chávez, Bacon-Sobbe, & Vargas-Larreta., 2008; Torres-Rojo, 2000).

La competencia como factor limitante de crecimiento radial de los árboles ha sido un tema de interés desde hace décadas (Cambrón-Sandoval, Suzán-Azpiri, Vargas-Hernández, Sánchez-Vargas, & Sáenz-Romero, 2013; Looney, D'Amato, Fraver, Palik, & Reinikainen, 2016; Tomé & Burkhart, 1989). Varios autores han evaluado los aclareos aplicados en rodales coetáneos y sus efectos sobre diversas variables dasométricas (Espinosa, García, & Valeria, 1994; Rodríguez-Ortiz et al., 2011; Kang, Shibuya, & Shin, 2014); sin embargo, los trabajos que han incursionado en la evaluación de rodales incoetáneos son pocos, debido principalmente a la complejidad de los factores que intervienen en los procesos de crecimiento y desarrollo de los árboles (Forget, Nolet, Doyon, Delagrangé, & Jardon, 2007).

El presente trabajo se enfocó en evaluar el crecimiento del arbolado residual en rodales mixtos e incoetáneos de pino que han sido aprovechados con métodos de selección, para analizar algunas de las variables que influyen en el crecimiento postcosecha y los procesos que ocurren como resultado de las actividades silviculturales.

Materiales y métodos

El área de estudio se ubica en el municipio de Santa María Lachixío en el estado de Oaxaca, México (Figura 1). El muestreo se hizo en dos rodales dominados por las especies *Pinus douglasiana* Martínez, *P. herrerae* Martínez, *P. lawsonii* Roezl ex Gordon, *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. pringlei* Shaw y *P. pseudostrobus* Lindl. Los rodales fueron identificados en el programa de manejo como II-03 con superficie de 43.07 ha y III-07 de 20.3 ha. El aprovechamiento comercial de los rodales se realizó en el año 2003 con intensidades de corta de

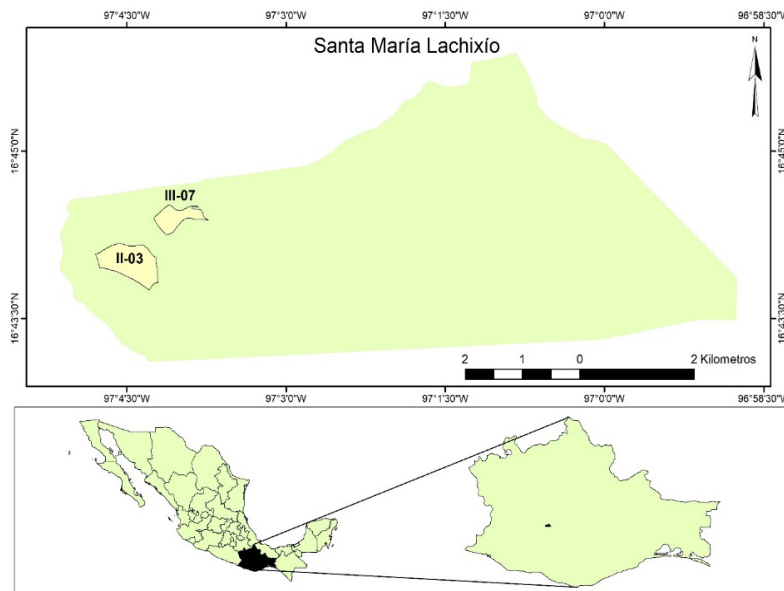


Figure 1. Location of evaluated *Pinus* stands in the state of Oaxaca, Mexico.

Figura 1. Ubicación de los rodales de *Pinus* evaluados en el estado de Oaxaca, México.

the border effect. At each point, the nearest stump was located that presented the authorization mark for timber harvesting in a visible manner and from which there was at least one living individual within a 10-m radius.

Each stump was used as the center of the sampling site from which a circular site with a 10-m radius was delimited, to encompass both residual trees with competitive influence ranging from 0 to 8.5 m, and those without influence (Fraver et al., 2014). All living trees within the sampling site were evaluated, for which two wood cores were obtained with a 6-mm Pressler drill. The tree-size variables diameter at breast height (cm) and height (m) were recorded, and the distance and diameter at breast height of competing trees were determined. To classify a tree as a “competitor,” the Bitterlich mobile plot method was used with a basal area factor of 4 (Crecente-Campo, Vázquez-Gómez, Rodríguez-Soalleiro, & Diéguez-Aranda, 2007). The following variables were also recorded at each sampling site: stump geographic coordinates, stump diameter (cm), elevation (m), average slope (degrees), and exposure (azimuth). Subsequently, for each tree evaluated, three distance-dependent competition indices were calculated and used as explanatory growth variables. The indices were as follows:

$$\text{Hegyí (1974)} \sum \frac{d_j}{d_i \cdot \text{Dist}_{ij}}$$

$$\text{Daniels, Burkhart, and Clason (1986)} \frac{d_i^2 \cdot n}{\sum_{i \neq j} d_j^2}$$

27.8 y 33.1 %, respectivamente. Para fines de este estudio, se establecieron 15 puntos de muestreo de manera aleatoria en cada rodal, considerando un área interna de 20 m desde la periferia para anular el efecto orilla. En cada punto se ubicó el tocón más cercano que presentara la marca de autorización para aprovechamiento forestal maderable de manera visible y a partir del cual existiera al menos un individuo vivo en un radio de 10 m.

Cada tocón se utilizó como el centro del sitio de muestreo a partir del cual se delimitó un sitio circular con radio de 10 m, para abarcar tanto árboles residuales con influencia de competencia que oscilaran entre 0 y 8.5 m, como aquellos sin influencia (Fraver et al., 2014). Todos los árboles vivos dentro del sitio de muestreo se evaluaron, para lo cual se obtuvieron dos núcleos de madera con taladro de Pressler de 6 mm, se registraron las variables dasométricas diámetro normal (cm) y altura (m), y se determinaron la distancia y el diámetro normal de los árboles competidores. Para clasificar a un árbol como “competidor” se utilizó el método de parcela móvil de Bitterlich con un factor de área basal de 4 (Crecente-Campo, Vázquez-Gómez, Rodríguez-Soalleiro, & Diéguez-Aranda, 2007). En cada sitio de muestreo se registraron además las siguientes variables: coordenadas geográficas del tocón, diámetro del tocón (cm), altitud (m), pendiente promedio (grados) y exposición (azimut). Posteriormente, para cada árbol evaluado, se calcularon tres índices de competencia dependientes de la distancia que se utilizaron como variables explicativas del crecimiento. Los índices fueron los siguientes:

$$\text{Martin and Ek (1984)} \sum_{i \neq j} \frac{d_j}{d_i} \cdot \exp\left(\frac{16 \cdot \text{Dist}_{ij}}{d_i + d_j}\right)$$

where,

d_i = diameter at breast height of the subject tree (cm)

d_j = diameter at breast height of the competing tree (cm)

Dist_{ij} = distance in horizontal projection between the subject tree and the competing tree (m)

n = number of competing trees.

The wood cores were processed using standard dendrochronology techniques for assembly, sanding and dating; the last-mentioned process was carried out with the WinDENDRO® program (Regent Instruments Inc., 2009) with support from the COFECHA (Grissino-Mayer, 2001) and Microsoft Excel® programs. From the WinDENDRO® program, ring width data series were obtained for each sample processed and then used to calculate the increase in basal area (IBA):

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

where,

R^2 = tree radius

n = year of ring formation

The IBA variable is less age-dependent than ring width, which remains stable in mature trees such as those in this study (Biondi, 1999; Martín-Benito, Del Rio, Heinrich, Helle, & Cañellas, 2010).

Growth trends were analyzed using the IBA in the 1993-2002 and 2004-2013 periods; the first period was established as a control or reference of the growth prior to the intervention or timber harvesting, and the second period was established as the growth period that would reflect the effects of such intervention. The period after the harvesting intervention was divided into two five-year periods, so that the growth response in the first years and in the short term (less than 10 years) could be analyzed in greater detail (Jones, Domke, & Thomas, 2009; Kang, Shibuya, & Shin, 2014).

The IBA of each growth ring for the same year is relative to the diameter of the individuals; in order to compare them, we calculated the percentage increase in basal area (PIBA), a variable similar to that used in other studies (Jones & Thomas, 2004; Powers et al., 2009) and standardized and independent of diameter. The PIBA was calculated with the following formula:

$$\text{PIBA} = [(C_2 - C_1) / C_1] * 100$$

where,

C_1 = growth period 1, corresponding to the average IBA of the 10 years prior to the silvicultural intervention (1993-2002).

$$\text{Hegyí (1974)} \sum \frac{d_j}{d_i \cdot \text{Dist}_{ij}}$$

$$\text{Daniels, Burkhart, and Clason (1986)} \frac{d_i^2 \cdot n}{\sum_{i \neq j} d_j^2}$$

$$\text{Martin and Ek (1984)} \sum_{i \neq j} \frac{d_j}{d_i} \cdot \exp\left(\frac{16 \cdot \text{Dist}_{ij}}{d_i + d_j}\right)$$

donde,

d_i = diámetro normal del árbol objetivo (cm)

d_j = diámetro normal del árbol competidor (cm)

Dist_{ij} = distancia en proyección horizontal entre el árbol objetivo y el árbol competidor (m)

n = número de árboles competidores.

Los núcleos de madera se procesaron mediante técnicas estándar de dendrocronología para su montaje, lijado y fechado; este último se realizó con el programa WinDENDRO® (Regent Instruments Inc., 2009) con apoyo de los programas COFECHA (Grissino-Mayer, 2001) y Microsoft Excel®. Del programa WinDENDRO® se obtuvieron series de datos de ancho de anillo para cada muestra procesada, las cuales se utilizaron para calcular el incremento en área basal (IAB):

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

donde,

R^2 = radio del árbol

n = año de formación del anillo

La variable IAB es menos dependiente de la edad que el ancho de anillo, la cual se mantiene estable en árboles maduros como los de este estudio (Biondi, 1999; Martín-Benito, Del Rio, Heinrich, Helle, & Cañellas, 2010).

Las tendencias de crecimiento se analizaron mediante el IAB en los periodos 1993-2002 y 2004-2013; el primer periodo se estableció como testigo o referencia del crecimiento previo a la intervención o aprovechamiento maderable, y el segundo periodo se estableció como el periodo de crecimiento que reflejaría los efectos de tal intervención. El periodo posterior a la intervención de aprovechamiento se dividió en dos quinquenios, de tal forma que la respuesta del crecimiento de los primeros años y a corto plazo (menos de 10 años) se pudiera analizar con mayor detalle (Jones, Domke, & Thomas, 2009; Kang, Shibuya, & Shin, 2014).

El IAB de cada anillo de crecimiento para un mismo año es relativo al diámetro de los individuos; para poder compararlos se calculó el porcentaje de incremento en área basal (PIAB), variable similar a la utilizada en otros estudios (Jones & Thomas, 2004; Powers et al., 2009) y

C_2 = growth period 2, corresponding to the average IBA for the 10 years following the silvicultural intervention (2004-2013).

The Kolmogorov-Smirnov normality test did not support the normal distribution of the PIBA data; therefore, the values were transformed into a natural logarithm. To avoid non-existent numbers, mathematically speaking, a value of 100 was added to all data prior to transformation.

Statistical analysis

The variables with the greatest influence on radial growth were identified with the stepwise selection method (Hocking, 1976) in the SAS program (Statistical Analysis Systems Institute, 2014). This method uses a critical value of $\alpha = 0.15$ by default for the discrimination of significant variables; the variables inputted for significance verification were diameter at breast height, height, stump distance, age, competition indices, stump diameter and elevation.

The variables selected with the stepwise method were used to model the natural logarithm of the PIBA (Ln_PIBA) by means of multiple linear regression, for which a model with the following structure was used:

$$\text{Ln_PIBA} = \beta + \alpha_n X_n + \varepsilon$$

where,

β = Intersection parameter

α = parameter of variable "X"

x = model variable

n = variable number

ε = model error.

The categorical (species and exposure) and site (slope) variables were subjected to a one-factor analysis of variance. Subsequently, for the categorical variables, a Tukey-Kramer comparison of means test ($P \leq 0.05$) was performed because the data are unbalanced in the groups, while the slope variable was analyzed with regression, because it is a continuous variable and because of the trends shown. Data processing and analysis were carried out with the SAS program (2014).

Results

Radial growth at individual tree level

Two samples were collected from each of the 204 individuals considered as subject trees in the 30 sampling sites; however, samples from seven trees could not be properly dated due to excess resin and lack of contrast in the rings, and three trees were less than 24 years old and therefore did not provide information

estandarizada e independiente del diámetro. El PIAB se calculó con la fórmula siguiente:

$$\text{PIAB} = [(C_2 - C_1) / C_1] * 100$$

donde,

C_1 = periodo de crecimiento 1, correspondiente al IAB promedio de los 10 años previos a la intervención silvícola (1993-2002).

C_2 = periodo de crecimiento 2, correspondiente al IAB promedio los 10 años posteriores a la intervención silvícola (2004-2013).

La prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov no sustentó la distribución normal de los datos de PIAB; por lo anterior, los valores se transformaron a logaritmo natural. Para evitar números no existentes, matemáticamente hablando, se sumó un valor de 100 a todos los datos, previo a la transformación.

Análisis estadístico

Las variables de mayor influencia en el crecimiento radial se identificaron con el método de selección *stepwise* (Hocking, 1976) en el programa SAS (Statistical Analysis Systems Institute, 2014). Este método utiliza un valor crítico de $\alpha = 0.15$ de manera predeterminada para la discriminación de variables significativas; las variables ingresadas para verificación de significancia fueron diámetro normal, altura, distancia al tocón, edad, índices de competencia, diámetro del tocón y altitud.

Las variables seleccionadas con el método *stepwise* se utilizaron para modelar el logaritmo natural del PIAB (Ln_PIAB) mediante regresión lineal múltiple, para lo cual se utilizó un modelo con la estructura siguiente:

$$\text{Ln_PIBA} = \beta + \alpha_n X_n + \varepsilon$$

donde,

β = parámetro de intersección

α = parámetro de la variable "X"

x = variable del modelo

n = número de variable

ε = error del modelo.

Las variables categóricas (especie y exposición) y de sitio (pendiente) se sometieron a un análisis de varianza de un factor. Posteriormente, para las variables categóricas, se hizo una prueba de comparación de medias de Tukey-Kramer ($P \leq 0.05$) debido a que los datos son desbalanceados en los grupos, mientras que la variable pendiente se analizó con regresión, por tratarse de una variable continua y por las tendencias mostradas. El procesamiento y análisis de datos se realizó con el programa SAS (2014).

from the 1993-2002 period. Due to the above, the final sample was 194 subject trees (Table 1).

Since species was not an important variable (not significant with $P > 0.05$) to explain the Ln_PIBA, as detailed in the section on site variables, subsequent analyses were performed for the total set of samples. Thus, three types of growth response or groups were obtained as a result of Tukey comparison of means tests ($\alpha = 0.05$) conducted for each subject tree. For this purpose, the average growth (IBA) of the 10 years after harvesting was contrasted with the average growth of the previous decade and the trends found were: significantly higher (G1), non-significant (G2) and significantly lower (G3) (Table 2). In the G1 group, the post-harvest period IBA was higher than the previous period IBA; *i.e.*, there was an increase in growth. In the G2 group, the IBA is the same before and after harvest, so there were no changes in growth. In the G3 group, the post-harvest IBA is lower than the previous period IBA, *i.e.*, the growth rate decreased. The annual IBA value of the individuals belonging to each group was averaged in the 1993-2013 assessment period, in order to determine the growth trend (Figure 2A).

Subsequently, the individuals belonging to each group (G1, G2 and G3) were analyzed again for two five-year post-harvest periods (2004-2008 and 2009-2013), comparing them with the immediate previous period respectively. The growth behavior of individuals within each group was called subgroups. Statistically significant increasing values were characterized with the value of 1. In addition, there are individuals that did not show significant growth; that is, they presented constant growth before and after the analyzed periods and were characterized with 0. Finally, others presented

Resultados

Crecimiento radial a nivel de árbol individual

Se colectó un par de muestras de cada uno de los 204 individuos considerados como árbol objetivo en los 30 sitios de muestreo; sin embargo, las muestras de siete árboles no se pudieron fechar adecuadamente por exceso de resina y falta de contraste en los anillos, y tres árboles presentaron edad menor de 24 años y, por tanto, no aportaban información del periodo 1993-2002. Debido a lo anterior, la muestra final fue de 194 árboles objetivo (Cuadro 1).

En virtud de que la especie no resultó ser una variable importante (no significativa con $P > 0.05$) para explicar el Ln_PIAB, tal y como se detalla en la sección correspondiente a variables del sitio, los análisis posteriores se realizaron para el conjunto total de muestras. De este modo, se obtuvieron tres tipos de respuesta o grupos de crecimiento de los árboles como resultado de las pruebas de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) realizadas para cada árbol objetivo. Para ello, el crecimiento promedio (IAB) de los 10 años posteriores al aprovechamiento se contrastó con el crecimiento promedio de la década anterior y las tendencias encontradas fueron: significativamente mayor (G1), no significativo (G2) y significativamente menor (G3) (Cuadro 2). En el grupo G1, el IAB del periodo posterior a la cosecha fue mayor al IAB del periodo anterior; es decir, hubo aumento en el crecimiento. En el grupo G2, el IAB es igual antes y después de la cosecha, por lo tanto, no hubo cambios en el crecimiento. En el grupo G3, el IAB del periodo postcosecha es menor al IAB del periodo anterior; es decir, la tasa de crecimiento disminuyó. El valor anual

Table 1. Summary of sample size by species and their tree-size characteristics.

Cuadro 1. Resumen del tamaño de muestra por especie y sus características dasométricas.

Species / Especie	Sample / Muestra	Diameter at breast height (cm) / Diámetro normal (cm)	Height (m) / Altura (m)
<i>Pinus douglasiana</i>	49	37.6 ± 13.96	27.9 ± 6.99
<i>Pinus herrerae</i>	52	35.7 ± 16.97	26.3 ± 8.64
<i>Pinus lawsonii</i>	37	31.1 ± 10.63	23.7 ± 6.52
<i>Pinus leiophylla</i>	2	40.5 ± 4.55	35.5 ± 3.43
<i>Pinus oocarpa</i>	1	50.0	29.6
<i>Pinus pringlei</i>	20	35.3 ± 18.88	26.0 ± 8.89
<i>Pinus pseudostrobus</i>	33	36.2 ± 13.80	27.1 ± 8.66
Total	194	35.5	26.4

± standard deviation of the mean

± desviación estándar de la media

negative growth; that is, their growth was significantly lower in the period analyzed compared to that of the previous period and were characterized as -1. The combination of growth trends (1, 0, -1) of individuals in each group in five-year period 1 (2004-2008) with five-year period 2 (2009-2013) yielded 14 subgroups (Table 3).

There were five subgroups with a value of 1 in the first five-year period (three in the G1 group and two in the G2 one) representing 45.9 % ($n = 89$) of the total sample; six subgroups presented 0 in the first five-year post-harvest period and represent 40.2 % ($n = 78$) of the total sample; finally, only three subgroups showed a value of -1 and represent 13.29 % ($n = 27$) of the total sample (Table 2).

The growth of the four G1 subgroups is presented in Figure 2B. Subgroup G1.1 increased its growth in both five-year periods, although the pre-harvest growth was the lowest of all subgroups. Subgroup G1.2 has the highest number of individuals of the total number of samples with 26 % (Table 2) and presents a positive growth behavior in the first five-year period and not significant in the second one. In subgroup G1.3 there is a response to growth that lasts approximately four years, but in the fifth year it shows a reduction. Finally, subgroup G1.4 shows irregular growth, although constant in both five-year periods.

Subgroups included in group G2 are shown in Figure 2C. Group G2.4 represents 23 % of the total samples and is the one with the highest representation in group G2 (Table 2). Subgroups G2.1 and G2.2 increased their growth during the first four or five years after harvest and then the rate decreased. Subgroup G2.6, although composed of only two individuals, showed a significant decrease in growth in the first five-year post-harvest period, from which it does not recover until the sixth year. The rest of the growth subgroups showed a relatively stable growth trend before and after the intervention.

Group G3 subgroups are presented in Figure 2D; it can be seen that the general pattern of this set is a decrease in growth. Subgroup G3.2 increased growth in the first three years after the intervention, although it was not statistically significant ($P > 0.05$). On the other hand, subgroup G3.4 was differentiated from the rest by high IBA values in the pre-harvest period, which are lost in subsequent years until reaching similar values to the rest of the subgroups.

Variable selection and regression

Nine variables were used to perform the stepwise selection process in the SAS program; five of them were important to explain the growth response of

de IAB de los individuos pertenecientes a cada grupo se promedió en el periodo de evaluación 1993-2013, para conocer la tendencia de crecimiento (Figura 2A).

Los individuos pertenecientes a cada grupo (G1, G2 y G3) se analizaron nuevamente para dos periodos de cinco años posteriores a la cosecha (2004-2008 y 2009-2013), comparándolos con el periodo anterior inmediato respectivamente. Al comportamiento del crecimiento de los individuos dentro de cada grupo se le denominó subgrupos. Los valores crecientes estadísticamente significativos fueron caracterizados con el valor de 1. Además, están los individuos que no presentaron crecimiento significativo; es decir, presentaron crecimiento constante antes y después de los periodos analizados y fueron caracterizados con 0. Finalmente, otros presentaron crecimiento negativo; es decir, su crecimiento fue significativamente menor en el periodo analizado en comparación con el del periodo previo y se caracterizaron como -1. La combinación de las tendencias de crecimiento (1, 0, -1) de los individuos en cada grupo en el quinquenio 1 (2004-2008) con el quinquenio 2 (2009-2013) produjo 14 subgrupos (Cuadro 3).

Los subgrupos con valor 1 en el primer quinquenio fueron cinco (tres del grupo G1 y dos en el G2) que representan 45.9 % ($n = 89$) del total de la muestra; seis subgrupos presentaron 0 en el primer quinquenio postcosecha y representan 40.2 % ($n = 78$) del total de la muestra; por último, solo tres subgrupos mostraron valor de -1 y representan 13.29 % ($n = 27$) del total de la muestra (Cuadro 2).

El crecimiento de los cuatro subgrupos del G1 se presenta en la Figura 2B. El subgrupo G1.1 aumentó su crecimiento en ambos quinquenios, a pesar de que el crecimiento anterior a la cosecha fue el más bajo de todos los subgrupos. El subgrupo G1.2 posee el mayor número de individuos del total de muestras con 26 % (Cuadro 2) y presenta un comportamiento positivo de crecimiento en el primer quinquenio y no significativo en el segundo quinquenio. En el subgrupo G1.3 se observa una respuesta al crecimiento que dura aproximadamente cuatro años, pero en el quinto año presenta una reducción. Finalmente, el subgrupo G1.4 muestra crecimiento irregular, aunque constante en ambos quinquenios.

Los subgrupos incluidos en el grupo G2 se muestran en la Figura 2C. El grupo G2.4 representa 23 % del total de muestras y es el de mayor representación en el grupo G2 (Cuadro 2). Los subgrupos G2.1 y G2.2 aumentaron su crecimiento durante los primeros cuatro o cinco años posteriores a la cosecha y después la tasa disminuyó. El subgrupo G2.6, aunque solo es representado por dos individuos, presentó un descenso significativo del crecimiento en el primer quinquenio

Table 2. Groups and subgroups of *Pinus* species trees, according to growth patterns in the basal area for two five-year periods after harvest.

Cuadro 2. Grupos y subgrupos de árboles de especies de *Pinus*, de acuerdo con los patrones de crecimiento en el área basal durante dos quinquenios posteriores a la cosecha.

Group/ Grupo	Subgroup/ Subgrupo	Five-year period 1*/ Quinquenio 1*	Five-year period 2*/ Quinquenio 2*	Individuals/ Individuos	Proportion (%)/ Proporción (%)	PIBA/ PIAB
G1	G1.1	1	1	9	5	248
G1	G1.2	1	0	50	26	145
G1	G1.3	1	-1	18	9	73
G1	G1.4	0	0	6	3	47
Subtotal		---	---	83	43	133
G2	G2.1	1	0	3	2	27
G2	G2.2	1	-1	9	5	12
G2	G2.3	0	1	4	2	22
G2	G2.4	0	0	45	23	3
G2	G2.5	0	-1	11	6	-7
G2	G2.6	-1	1	2	1	-13
Subtotal		---	---	74	38	4
G3	G3.1	0	0	5	3	-36
G3	G3.2	0	-1	7	4	-36
G3	G3.3	-1	0	18	9	-46
G3	G3.4	-1	-1	7	4	-46
Subtotal		---	---	37	19	-43
Total				194	100	71

*The numbers represent the difference from the previous group: 1 = significant positive growth, 0 = non-significant growth, and -1 = significant negative growth; PIBA = percentage increase in basal area.

*Los números representan la diferencia con respecto al grupo anterior: 1 = crecimiento significativo positivo, 0 = crecimiento no significativo, y -1 = crecimiento significativo negativo; PIAB = porcentaje de incremento en área basal.

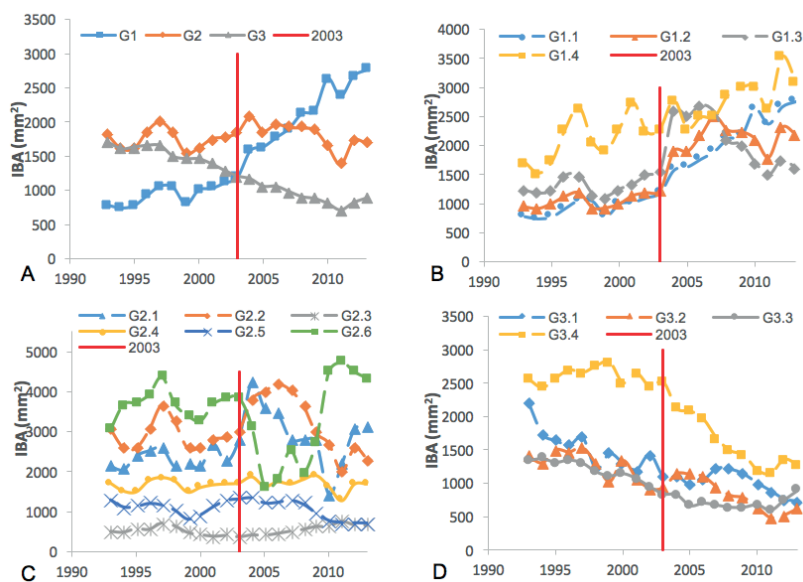


Figure 2. Growth trends of basal area growth (IBA) groups and subgroups in *Pinus* species, before and after commercial harvesting of stands in 2003 (red line).

Figura 2. Tendencias de crecimiento en grupos y subgrupos de crecimiento de área basal (IBA) en especies de *Pinus*, antes y después del aprovechamiento comercial de los rodales en el 2003 (línea roja).

residual trees, which were used to develop a multiple linear regression model (Table 3). The regression results showed that elevation is the only non-significant variable.

It can be seen that, although the multiple regression model provided results that allow discerning the influence of each variable on the PIBA, the percentage of total variability that this model explains is low ($R^2 = 0.16$). Therefore, a graphic analysis of the most important variables in the general model was made individually.

Figure 3 presents the behavior of the PIBA logarithm with respect to the four most important variables to explain the growth response. The four graphs show the regression line of each of the variables (dotted line), the regression equation, the coefficient of determination (R^2) and the zero growth line (PIBA = 0) that is located on the logarithm scale with a value of 4.605.

In this study, stump diameter was the most important variable to explain the growth response to the cutting (Figure 3C), followed by the Hegyi competition index (Figure 3A) and diameter at breast height (Figure 3B). In the case of the Hegyi index, the regression line intersects that of zero growth at a value of approximately 4.3, indicating that, at this level of competition, the residual trees no longer respond to release by selection cutting.

The relationship between Ln_PIBA and diameter at breast height of the trees shows a negative trend (Figure 3B). The regression line intersects the zero

postcosecha del cual se recupera hasta el sexto año. El resto de los subgrupos de crecimiento presentaron una tendencia relativamente estable en el crecimiento antes y después de la intervención.

Los subgrupos del grupo G3 se presentan en la Figura 2D; se observa que el patrón general de este conjunto es de disminución en el crecimiento. El subgrupo G3.2 incrementó el crecimiento en los tres primeros años posteriores a la intervención, aunque no resultó significativo estadísticamente ($P > 0.05$). Por otro lado, el subgrupo G3.4 se diferenció del resto por los valores altos de IAB en el periodo precosecha, los cuales se pierden en los años posteriores hasta alcanzar valores semejantes al resto de los subgrupos.

Selección de variables y regresión

Se utilizaron nueve variables para realizar el proceso de selección *stepwise* en el programa SAS; cinco de ellas fueron importantes para explicar la respuesta en crecimiento del arbolado residual, mismas que se usaron para elaborar un modelo de regresión lineal múltiple (Cuadro 3). Los resultados de la regresión mostraron que la elevación es la única variable no significativa.

Se observa que, si bien el modelo de regresión múltiple proporcionó resultados que permiten discernir la influencia de cada variable sobre el PIAB, el porcentaje de la variabilidad total que este modelo explica es bajo ($R^2 = 0.16$). Por lo anterior, se hizo un análisis gráfico de las variables más importantes en el modelo general de manera individual.

Table 3. Estimated parameters and linear regression statistics of the significant variables in the growth of *Pinus* residual trees, selected with the stepwise procedure.

Cuadro 3. Parámetros estimados y estadísticos de la regresión lineal de las variables significativas en el crecimiento del arbolado residual de *Pinus*, seleccionadas con el procedimiento *stepwise*.

Variable	Estimated parameters (α)/ Parámetros estimados (α)	Standard error/ Error estándar	Pr > F
Intercept/Intercepto	7.56019	1.24559	<.0001
Stump diameter (X_1)/Diámetro de tocón (X_1)	0.00915	0.00257	0.0005
Distance to stump (X_2)/Distancia al tocón (X_2)	-0.03267	0.01567	0.03840
Hegyi competition index (X_3)/ Índice de competencia de Hegyi (X_3)	-0.18319	0.04653	0.0001
Diameter at breast height (X_4)/ Diámetro normal (X_4)	-0.01326	0.00338	0.0001
Elevation (X_5)/Elevación (X_5)	-0.00085381	0.00049929	0.0889

model: $\text{Ln_PIBA} = \alpha + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 X_5 + \epsilon$. $\alpha = 0.05$; adjusted $R^2 = 0.156$.

modelo: $\text{Ln_PIAB} = \alpha + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \alpha_4 X_4 + \alpha_5 X_5 + \epsilon$. $\alpha = 0.05$; R^2 ajustada = 0.156.

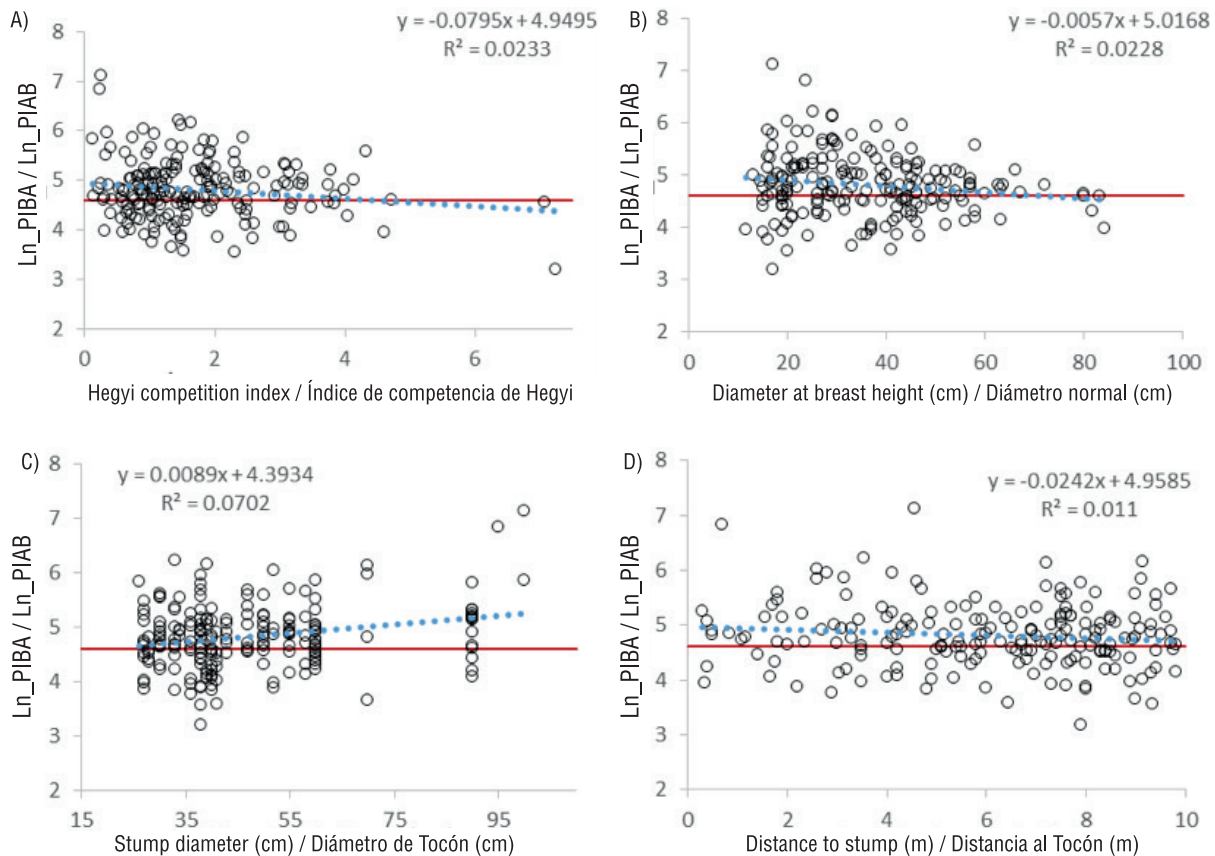


Figure 3. Linear regression of the most important variables in the growth response of the residual *Pinus* trees, after the selection cutting.

Figura 3. Regresión lineal de las variables más importantes en la respuesta del crecimiento del arbolado residual de *Pinus*, después de las cortas de selección.

growth line at 72 cm, an average value after which the individual is unlikely to respond to the release of space derived from the cuttings made.

A positive relationship between Ln_PIAB and stump diameter is observed (Figure 3C); in this case, the regression line intersects zero growth at 23.7 cm, a diameter below which the growth space released by a cut specimen is unlikely to have a positive impact on the growth of residual trees.

The distance to the stump is negatively related to Ln_PIAB. The regression line does not intersect the zero growth value within the sampling radius established in the evaluation (10 m); however, it was possible to project the line with the parameters obtained and this intersection could be located at 14.6 m, which is interpreted as the limit distance in which the remaining trees are influenced by the cutting of a competing individual.

Variables at site level

The influence of site exposure on Ln_PIAB was significant ($P = 0.014$). The effect of SE exposure differs

La Figura 3 presenta el comportamiento del logaritmo del PIAB con respecto a las cuatro variables de mayor importancia para explicar la respuesta del crecimiento. En las cuatro gráficas se presenta la línea de regresión de cada una de las variables (línea punteada), la ecuación de regresión, el coeficiente de determinación (R^2) y la línea de crecimiento cero (PIAB = 0) que se ubica en la escala de logaritmo con valor 4.605.

En este estudio, el diámetro del tocón fue la variable más importante para explicar la respuesta del crecimiento a las cortas (Figura 3C), seguida del índice de competencia de Hegyi (Figura 3A) y del diámetro normal (Figura 3B). En el caso del índice de Hegyi, la línea de regresión interseca a la de crecimiento cero en un valor aproximado de 4.3, lo que indica que, en este nivel de competencia, el arbolado residual ya no responde a la liberación por cortas de selección.

La relación entre el Ln_PIAB con el diámetro normal del arbolado muestra una tendencia negativa (Figura 3B). La línea de regresión interseca a la línea de crecimiento cero en 72 cm, valor promedio después del cual es probable que el individuo no responda a la liberación de espacio derivada de las cortas realizadas.

in the growth response (Ln_PIBA), as it was smaller than the rest of the exposures (Figure 4). In the case of the species, the test showed no significant variation in Ln_PIBA ($P > 0.1854$).

Figure 5 shows that the decreasing trend of the Ln_PIBA as the slope value increases is notable. There is also a regression line (blue) and a zero growth reference value (red) on the logarithm scale, which do not intersect.

Figure 6 shows the logarithm of the PIBA as a function of the basal area of the site (sum of the basal area of each individual). The regression line intersects the zero growth value at 1.33 m^2 ; after that value, the average site growth is nullified by the remaining competition. The average overall growth of the 30 sites is 71 %.

Discussion

Radial growth at individual tree level

There is a significant post-harvest growth response in 47 % of residual trees; the remaining 53 % shows non-significant growth, which does not necessarily imply that there is no response to treatment, but that in some subgroups such as G1.3 and G2.2, growth occurs

Se observa una relación positiva entre el Ln_PIAB y el diámetro del tocón (Figura 3C); en este caso, la línea de regresión interseca al crecimiento cero a los 23.7 cm, diámetro por debajo del cual es poco probable que el espacio de crecimiento que libera un ejemplar cortado impacte de manera positiva en el crecimiento del arbolado residual.

La distancia al tocón se relaciona con el Ln_PIAB de manera negativa. La línea de regresión no interseca al valor de crecimiento cero dentro del radio de muestreo establecido en la evaluación (10 m); sin embargo, fue posible proyectar la línea con los parámetros obtenidos y se pudo ubicar dicha intersección a los 14.6 m, lo cual se interpreta como la distancia límite en la cual los árboles remanentes se ven influenciados por la corta de un individuo competidor.

Variables a nivel de sitio

La influencia de la exposición del sitio sobre Ln_PIAB resultó significativa ($P=0.014$). El efecto de la exposición SE difiere en la respuesta del crecimiento (Ln_PIAB), ya que fue menor que el resto de las exposiciones (Figura 4). En el caso de la especie, la prueba no mostró variación significativa en el Ln_PIAB ($P > 0.1854$).

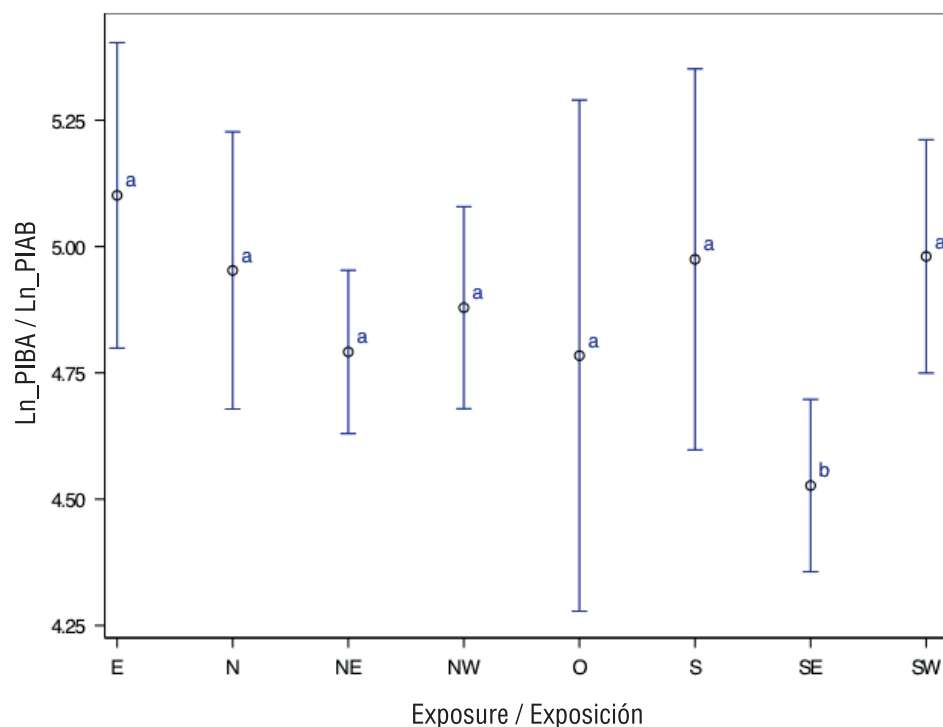


Figure 4. Percentage increase in basal area (Ln_PIBA) in *Pinus* species with respect to site exposure. Means with different letters indicate significant differences according to the Tukey-Kramer test ($P \leq 0.05$).

Figura 4. Porcentaje de incremento de área basal (Ln_PIAB) en especies de *Pinus* con respecto a la exposición del sitio. Medias con letras distintas indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey-Kramer ($P \leq 0.05$).

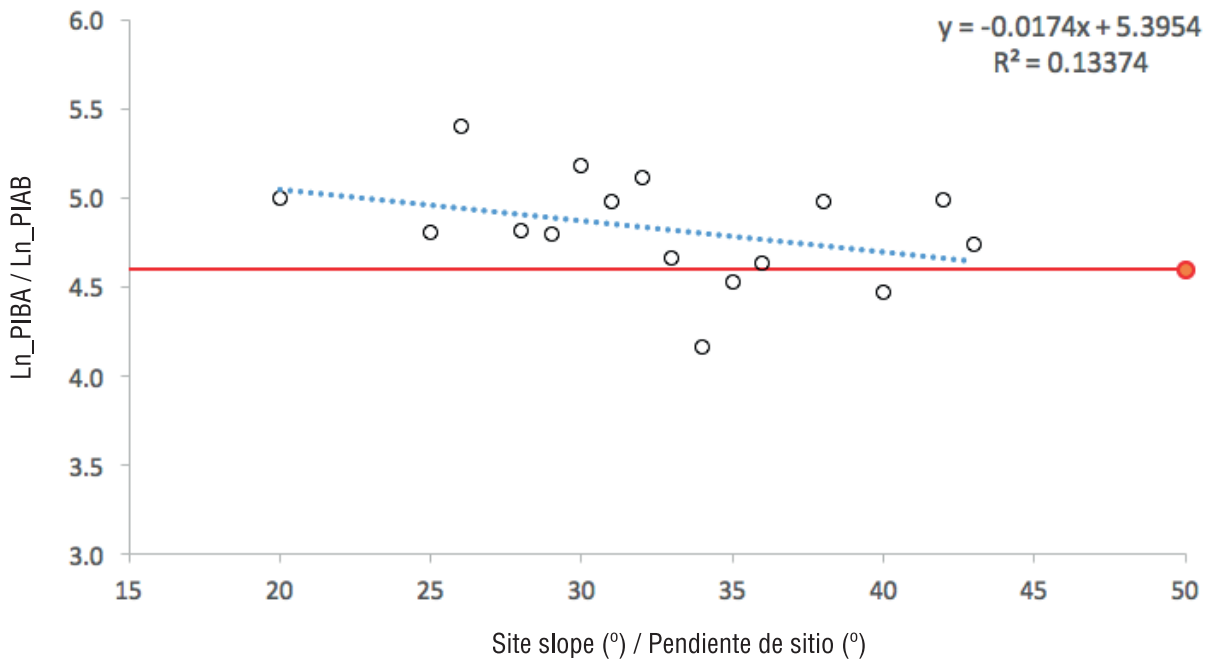


Figure 5. Logarithm regression of the percentage increase in basal area (Ln_PIAB) in *Pinus* species against average site slope values.

Figura 5. Regresión del logaritmo del porcentaje de incremento de área basal (Ln_PIAB) en especies de *Pinus* contra los valores promedio de la pendiente del sitio.

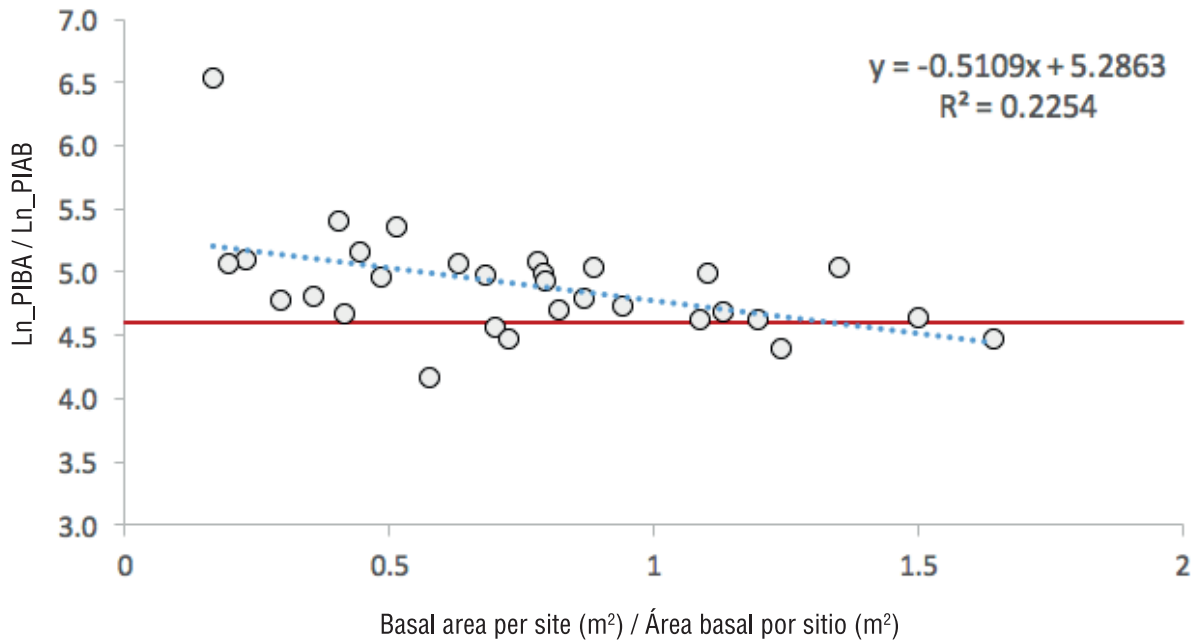


Figure 6. Logarithm regression of the percentage increase in basal area (Ln_PIAB) as a function of the basal area of the sampling sites.

Figura 6. Regresión del logaritmo del porcentaje de incremento de área basal (Ln_PIAB) en función del área basal de los sitios de muestreo.

in a limited period of only four to five years. This coincides with what was reported by Kang et al. (2014) in a thinning experiment in *P. koraiensis* Siebold & Zucc. in South Korea, where growth was observed in a period of three to five years after thinning. This suggests that individuals respond positively to the cutting for a limited time and that the effect is possibly terminated by the remaining competition at the site. On the other hand, subgroup G1.2 showed a positive effect on the growth of individuals during a period equal to or greater than 10 years after the intervention (Table 2); the same period was reported for *Acer saccharum* Marshall and *Fagus grandifolia* Ehrhart in Canada (Jones et al., 2009). The pre-harvest growth pattern of group G1, significantly lower than that of the other two groups, could be explained mainly by the competition, which implies that the suppressed trees have responded better to the release of space (Figure 2A). The same happened with subgroup G1.2, as the individuals had the lowest pre-harvest growth of the entire group and benefited most from the cuttings made. Although there is no record of similar research, stand-level studies have concluded that growth response is positively related to the intensity of the release (Espinosa et al., 1994; Kariuki, 2008), which coincides with what was found in this work.

The most important variables to explain the PIBA were stump diameter, competition and diameter at breast height. In this respect, Dolezâl, Ishii, Vetrova, Sumida, and Hara (2004) found that competition and size were the most important variables in the genera *Betula* and *Larix*. Competition is a factor of great importance for growth, as several authors have demonstrated (Das, 2012; King, Davies, Nur-Supardi, & Tan, 2005; Pedersen, Bollandsås, Gobakken, & Næsset, 2012; Sánchez-Salguero et al., 2015).

The size of the stump and the distance to it are variables that are related to the intensity of the competition exerted by the felled tree and that was exploited by the residual trees at the site. In Mexico, no studies with a methodology similar to the present work have been reported; however, some have evaluated growth as a function of competition and their results are comparable to those of this research, since in both cases areas of influence are determined from the competition of living and felled individuals. The 14.6-m radius of influence found in this study exceeds that reported in other studies with intervals of 5.5 to 6.5 m (von Oheimb et al., 2011), 6.7 to 8.5 m (Fraver et al., 2014) and 7 m in others (Looney et al., 2016). The difference in the results described may be due to the effect of the size (diameter and height) of the individuals evaluated; Fraver et al. (2014) do not provide precise data, although they report that the evaluated trees exceptionally exceed 20 m in height;

La Figura 5 muestra que la tendencia decreciente del Ln_PIAB conforme el valor de la pendiente aumenta es notable. Se observa también una línea de regresión (azul) y otra de valor de referencia de crecimiento cero (rojo) en la escala de logaritmos, las cuales no se intersecan.

La Figura 6 muestra el logaritmo del PIAB en función del área basal del sitio (suma del área basal de cada individuo). La línea de regresión interseca al valor de crecimiento cero en 1.33 m²; después de dicho valor, el crecimiento promedio del sitio se nulifica por la competencia remanente. El promedio de crecimiento general de los 30 sitios es de 71 %.

Discusión

Crecimiento radial a nivel de árbol individual

Existe una respuesta significativa del crecimiento posterior a las actividades de cosecha en 47 % del arbolado residual; el 53 % restante muestra crecimiento no significativo, lo cual no necesariamente implica que no haya respuesta al tratamiento, sino que, en algunos subgrupos como G1.3 y G2.2, el crecimiento se presenta en un periodo limitado de solo cuatro a cinco años. Esto coincide con lo reportado por Kang et al. (2014) en un experimento de aclareos en *P. koraiensis* Siebold & Zucc. en Corea del Sur, donde el crecimiento se observó en un periodo de tres a cinco años después de los aclareos. Lo anterior sugiere que los individuos responden positivamente a la corta durante un lapso limitado y que el efecto se termina posiblemente por la competencia remanente en el sitio. Por otra parte, el subgrupo G1.2 mostró efecto positivo en el crecimiento de los individuos durante un periodo igual o mayor de 10 años después de la intervención (Cuadro 2); el mismo periodo fue reportado para *Acer saccharum* Marshall y *Fagus grandifolia* Ehrhart en Canadá (Jones et al., 2009). El patrón de crecimiento precosecha del grupo G1, significativamente menor al de los otros dos grupos, podría ser explicado principalmente por la competencia, lo que implica que los árboles suprimidos hayan respondido de mejor manera a la liberación del espacio (Figura 2A). Esto mismo sucedió con el subgrupo G1.2, ya que los individuos presentaron el menor crecimiento precosecha de todo el grupo y fueron los que más se beneficiaron con las cortas realizadas. Aunque no se tiene registro de investigaciones similares, estudios a nivel rodal han concluido que la respuesta en crecimiento se relaciona de forma positiva con la intensidad de la liberación (Espinosa et al., 1994; Kariuki, 2008), lo cual coincide con lo encontrado en este trabajo.

Las variables más importantes para explicar el PIAB fueron el diámetro del tocón, la competencia y el

von Oheimb et al. (2011) report 9.5 cm in diameter and 11.5 m in height, while Looney et al. (2016) report an average diameter of 22.2 ± 15 cm. These measures differ in the individuals evaluated in this study, which had a stump diameter of 48.4 ± 19.7 cm. It is possible that the radius of influence of competition obtained in this work differs from those obtained in the studies mentioned above, due to differences in tree height, as well as discrepancies attributable to the variables used (*i.e.* stump diameter at 0.3 m contrasted with diameter at breast height at 1.3 m in other works).

The result of the site's elevation contrasts with the studies of Dang, Jiang, Zhang, and Zhang (2007) and Liu, Liang, Liu, and Camarero (2018), who did find that elevation influenced growth. The discrepancy with the present study can be attributed to the limited interval of evaluated data that has approximately 300 m of difference, against 1 950 and 700 m of altitudinal gradient in the referred studies.

Results by species vary in each study; some coincide with what was obtained in the present work (Das, 2012; Huang, Stadt, Dawson, & Comeau, 2013), while others report significant variations (King et al., 2005), which is possibly related to the physiology of the investigated species.

Site-level growth

The sites showed an average increase in growth of 71 %, which is similar to that reported by Forget et al. (2007), who obtained increases of between 45 and 50 % in stands with a 29 % thinning intensity. Although the increase data are comparable, the present study limits the PIBA to the area evaluated in the 30 sites and not at stand level.

A threshold of 1.3 m² of residual basal area was identified as the site competition limit ($41.3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$), after which the release of competition due to the effect of cutting has no influence on the growth of residual trees. Due to the lack of comparable studies, it is hypothesized that the remaining competition impedes the average development of the residual individuals.

The negative growth results in SE exposure contrast with those of Li et al. (2014), where the southern exposure does benefit it. The difference can be attributed to the latitudinal level, since at 29° N (cited study), solar radiation is received mainly in southern exposure and it is what generates better growth conditions; on the other hand, at 16° N (present study), solar radiation is received at N and S exposures depending on the time of year.

The negative linear relationship between site slope and tree growth (Figure 5) suggests that the site reaches

diámetro normal. Al respecto, Dolezâl, Ishii, Vetrova, Sumida, y Hara (2004) encontraron que la competencia y el tamaño fueron las variables de mayor importancia en los géneros *Betula* y *Larix*. La competencia es un factor de gran importancia para el crecimiento, tal como lo han demostrado diversos autores (Das, 2012; King, Davies, Nur-Supardi, & Tan, 2005; Pedersen, Bollandsås, Gobakken, & Næsset, 2012; Sánchez-Salguero et al., 2015).

El tamaño del tocón y la distancia al mismo son variables que están relacionadas con la intensidad de la competencia que ejercía el árbol derribado y que fue aprovechada por el arbolado residual en el sitio. En México, no se han reportado estudios con metodología similar al presente trabajo; sin embargo, algunos han evaluado el crecimiento en función de la competencia y sus resultados son comparables a los de esta investigación, ya que en ambos casos se determinan áreas de influencia de la competencia de los individuos en vida y derribados. Los 14.6 m de radio de influencia encontrados en este estudio superan lo reportado en otros trabajos con intervalos de 5.5 a 6.5 m (von Oheimb et al., 2011), 6.7 a 8.5 m (Fraver et al., 2014) y 7 m en otros (Looney et al., 2016). La diferencia en los resultados descritos puede deberse al efecto del tamaño (diámetro y altura) de los individuos evaluados; Fraver et al. (2014) no precisan datos, aunque describen que los árboles evaluados exceden de manera excepcional los 20 m de altura; von Oheimb et al. (2011) reportan 9.5 cm de diámetro y 11.5 m de altura, mientras que Looney et al. (2016) reportan un diámetro promedio de 22.2 ± 15 cm. Dicha medidas difieren en los individuos evaluados en el presente estudio, los cuales tuvieron diámetro de tocón de 48.4 ± 19.7 cm. Es posible que el radio de influencia de competencia obtenido en este trabajo difiera con los obtenidos en los estudios antes citados, debido a las diferencias de altura del arbolado, además de las discrepancias imputables a las variables usadas (*i. e.* diámetro del tocón a 0.3 m contrastado con el diámetro normal a 1.3 m en otros trabajos).

El resultado de la elevación del sitio contrasta con los estudios de Dang, Jiang, Zhang, y Zhang (2007) y Liu, Liang, Liu, y Camarero (2018), quienes sí encontraron influencia de la altitud sobre el crecimiento. La discrepancia con el presente estudio puede atribuirse al intervalo limitado de datos evaluados que tiene aproximadamente 300 m de diferencia, contra los 1 950 y 700 m de gradiente altitudinal en los estudios referidos.

Los resultados por especie varían en cada estudio; algunos coinciden con lo obtenido en el presente trabajo (Das, 2012; Huang, Stadt, Dawson, & Comeau, 2013), mientras que otros reportan variaciones significativas (King et al., 2005), lo cual posiblemente esté relacionado con la fisiología de las especies investigadas.

zero growth at an approximately 45° slope. A similar study reported a weak negative parameter (*i.e.* with a probability value close to the established α value), resulting from the regression between the slope and the average radial growth of *Quercus fabri* Hance, although for *Castanopsis fargesii* Franch. it was not significant (von Oheimb et al., 2011). These results are consistent with those reported in the present study. The negative influence of slope on growth is possibly not due to physical condition, but to the edaphoclimatic conditions it generates, since it has been found that an increase in slope is related to a decrease in site quality (Wanshnong, Thakuria, Sangma, Ram, & Bora, 2013).

Conclusions

Only half of the residual trees increased their growth in response to selection cutting; individuals suppressed in pre-harvest benefited the most from space release. Competition was the most influential variable in growth, along with the size of the individual evaluated. This study presents data on trends, limits and thresholds that may be useful in making forest management decisions; for example, starting from the growth response threshold, stand management can be modulated according to water stress and expected climatic changes. The methodology was useful to evaluate the effect of selection cutting, although it is possible to implement improvements in the selection criteria of competing trees and in the choice of competition indices. It is also necessary to establish permanent sampling plots to draw more solid conclusions on the effects of thinning and cutting in the analyzed stands.

Acknowledgments

The authors wish to thank the following: the community authorities of Santa María Lachixío, Oaxaca for the support provided in planning and data collection in the field; CONACYT for the support granted to the first author through grant 428413, indispensable for the development of the research, and the Colegio de Postgraduados for funding and logistical support.

End of English version

References / Referencias

- Biondi, F. (1999). Comparing tree-ring chronologies and repeated timber inventories as forest monitoring tools. *Ecological Applications*, 9(1), 216–227. Retrieved from <https://wolfweb.unr.edu/homepage/fbiondi/EcolApplic1999.pdf>
- Cambrón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Vargas-Hernández, J. J., Sánchez-Vargas, N. M., & Sáenz-

Crecimiento a nivel sitio

Los sitios mostraron un aumento en crecimiento promedio de 71 %, el cual es semejante a lo reportado por Forget et al. (2007), quienes obtuvieron incrementos de entre 45 y 50 % en rodales con aclareo de 29 % de intensidad de corta. Aunque los datos de incremento son comparables, el presente estudio acota el PIAB al área evaluada en los 30 sitios y no a nivel rodal.

Se identificó un umbral de 1.3 m² de área basal residual como límite de competencia en el sitio (41.3 m².ha⁻¹), después del cual la liberación de competencia por efecto de cortas no tiene influencia en el crecimiento del arbolado residual. Debido a la falta de estudios comparables, se postula la hipótesis de que la competencia remanente impide el desarrollo promedio de los individuos residuales.

Los resultados negativos de crecimiento en exposición SE contrastan con los de Li et al. (2014), donde la exposición sur sí lo beneficia. La diferencia puede atribuirse al nivel latitudinal, ya que a 29° N (estudio citado), la radiación solar se recibe principalmente en la exposición sur y es lo que genera mejores condiciones de crecimiento; en cambio, a los 16° N (presente estudio), la radiación solar se recibe en exposiciones N y S dependiendo de la época del año.

La relación lineal negativa entre la pendiente del sitio y el crecimiento de los árboles (Figura 5) sugiere que este alcanza la línea de crecimiento cero aproximadamente en los 45° de pendiente. En un estudio similar se reportó un parámetro negativo débil (*i. e.* con valor de probabilidad cercano al valor α establecido), resultado de la regresión entre la pendiente y el crecimiento radial promedio de *Quercus fabri* Hance, aunque para *Castanopsis fargesii* Franch. resultó no significativo (von Oheimb et al., 2011). Estos resultados concuerdan con los reportados en el presente trabajo. La influencia negativa de la pendiente sobre el crecimiento posiblemente no se deba a la condición física, sino a las condiciones edafoclimáticas que genera, pues se ha encontrado que el aumento de la pendiente se relaciona con la disminución en la calidad del sitio (Wanshnong, Thakuria, Sangma, Ram, & Bora, 2013).

Conclusiones

Solo la mitad del arbolado residual aumentó su crecimiento como respuesta a las cortas de selección; los individuos suprimidos en precosecha fueron los más beneficiados con la liberación de espacio. La competencia fue la variable más influyente en el crecimiento, en conjunto con el tamaño del individuo evaluado. Este estudio presenta datos de tendencias, límites y umbrales que pueden ser útiles en la toma de decisiones del manejo forestal; por ejemplo, a partir del

- Romero, C. (2013). Estrategias de crecimiento y distribución de biomasa en *Pinus pseudostrobus* bajo diferentes condiciones de competencia. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 36(1), 71–79.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2001). Programa estratégico forestal para México 2025. Retrieved from http://era-mx.org/biblio/PEF_2025.pdf
- Crecente-Campo, F., Vázquez-Gómez, E., Rodríguez-Soalleiro, R., & Diéguez-Aranda, U. (2007). Influencia de la competencia en el crecimiento individual de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 23, 167–174. Retrieved from http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernos_secf/article/view/9620/9538
- Dang, H., Jiang, M., Zhang, Q., & Zhang, Y. (2007). Growth responses of subalpine fir (*Abies fargesii*) to climate variability in the Qinling Mountain, China. *Forest Ecology and Management*, 240(1-3), 143–150. doi: 10.1016/j.foreco.2006.12.021
- Daniels, F., Burkhart, H. E., & Clason, T. R. (1986). A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 16(6), 1230–1237. doi: 10.1139/x86-218
- Das, A. (2012). The effect of size and competition on tree growth rate in old-growth coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(11), 1983–1995. doi: 10.1139/x2012-142
- Dolezâl, J., Ishii, H., Vetrova, V. P., Sumida, A., & Hara, T. (2004). Tree growth and competition in a *Betula platyphylla*-*Larix cajanderi* post-fire forest in Central Kamchatka. *Annals of Botany*, 94(3), 333–343. doi: 10.1093/aob/mch149
- Espinosa, B. M., García, S. M., & Valeria, E. O. (1994). Efecto de intensidades diferentes de raleo en el crecimiento de un rodal de pino radiata. *Bosque*, 15(1), 55–65. doi: 10.4206/bosque.1994.v15n1-07
- Forget, E., Nolet, P., Doyon, F., Delagrangé, S., & Jardon, Y. (2007). Ten-year response of northern hardwood stands to commercial selection cutting in southern Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 242(2-3), 764–765. doi: 10.1016/j.foreco.2007.02.010
- Fraver, S., D'Amato, A. W., Bradford, J. B., Jonsson, B. G., Jönsson, M., & Esseen, P-A. (2014). Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: influence of tree spatial patterning. *Journal of Vegetation Science*, 25(2), 374–385. doi: 10.1111/jvs.12096
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating cross dating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57(2), 205–221. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/244461190_Evaluating_crossdating_accuracy_a_manual_and_tutorial_for_the_computer_program_COFECHA
- Hegyí, F. (1974). A simulation model for managing jack pine stands. In J. Fries (Ed.), *Growth models for tree and stand simulation* (pp. 74–90). Stockholm, Sweden: Royal Coll. of For.
- umbral de respuesta en crecimiento se puede modular el manejo de rodales, de acuerdo con el estrés hídrico y los cambios climáticos esperados. La metodología fue útil para evaluar el efecto de las cortas de selección, aunque es posible implementar mejoras en los criterios de selección de árboles competidores y en la elección de índices de competencia. Asimismo, es necesario establecer parcelas permanentes de muestreo para concluir de manera más sólida sobre los efectos de aclareos y cortas en los rodales analizados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades comunales de Santa María Lachixío, Oaxaca por el apoyo proporcionado en la planeación y colecta de datos en campo. Se agradece al CONACYT por el apoyo otorgado al primer autor a través de la beca 428413, indispensable para el desarrollo de la investigación. Al Colegio de Postgraduados por el financiamiento y apoyo logístico.

Fin de la versión en español

- Hernández-Díaz, J. C., Corral-Rivas, J. J., Quiñonez-Chávez, A., Bacon-Sobbe, J. R., & Vargas-Larreta, B. (2008). Evaluación del manejo forestal regular e irregular en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Madera y Bosques*, 14(3), 25–41. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v14n3/v14n3a2.pdf>
- Hocking, R. R. (1976). The analysis and selection of variables in linear regression. *Biometrics*, 32(1), 1–49. doi: 10.2307/2529336
- Huang, J-G., Stadt, K. J., Dawson, A., & Comeau P. G. (2013). Modelling growth-competition relationships in trembling aspen and white spruce mixed boreal forests of western Canada. *PLoS ONE*, 8(10), 1–14. doi: 10.1371/journal.pone.0077607
- Jones, T. A., Domke, G. M., & Thomas, S. C. (2009). Canopy tree growth responses following selection harvest in seven species varying in shade tolerance. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(2), 430–440. doi: 10.1139/X08-186
- Jones, T. A., & Thomas, S. C. (2004). The time course of diameter increment responses to selection harvests in *Acer saccharum*. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 1525–1533. doi: 10.1139/X04-034
- Kang, J-S., Shibuya, M., & Shin, C-S. (2014). The effect of forest-thinning works on tree growth and forest environment. *Forest Science and Technology*, 10(1), 33–39. doi: 10.1080/21580103.2013.821958
- Kariuki, M. (2008). Modelling the impacts of various thinning intensities on tree growth and survival in a mixed

- species eucalypt forest in central Gippsland, Victoria, Australia. *Forest Ecology and Management*, 256(12), 2007–2017. doi: 10.1016/j.foreco.2008.07.035
- King, D. A., Davies, S. J., Nur-Supardi, M. N., & Tan S. (2005). Tree growth is related to light interception and wood density in two mixed dipterocarp forests of Malaysia. *Functional Ecology*, 19(3), 445–453. doi: 10.1111/j.1365-2435.2005.00982.x
- Li, Y., Härdtle, W., Bruelheide, H., Nadrowski, K., Scholten, T., von Wehrden, H., & von Oheimb, G. (2014). Site and neighborhood effects on growth of tree saplings in subtropical plantations (China). *Forest Ecology and Management*, 327, 118–127. doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.039
- Liu, B., Liang, E., Liu, K., & Camarero, J. J. (2018). Species- and elevation-dependent growth responses to climate warming of Mountain Forests in the Qinling Mountains, Central China. *Forests*, 9(5), 1–11. doi: 10.3390/f9050248
- Looney, C. E., D'Amato, A. W., Fraver, S., Palik, B. J., & Reinikainen, M. R. (2016). Examining the influences of tree-to-tree competition and climate on size-growth relationships in hydric, multi-aged *Fraxinus nigra* stands. *Forest Ecology and Management*, 375, 238–248. doi: 10.1016/j.foreco.2016.05.050
- Martín-Benito, D., Del Rio, M., Heinrich, I., Helle, G., & Cañellas, I. (2010). Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 967–975. doi: 10.1016/j.foreco.2009.12.001
- Martin, L., & Ek, A. R. (1984). A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter growth. *Forest Science*, 30(3), 731–743. doi: 10.1093/forestscience/30.3.731
- Pedersen, R. O., Bollandsås, O. M., Gobakken, T., & Næsset, E. (2012). Deriving individual tree competition indices from airborne laser scanning. *Forest Ecology and Management*, 280, 150–165. doi: 10.1016/j.foreco.2013.07.040
- Powers, M. D., Pregitzer, K. S., Palik, B. J., & Webster, C. R. (2009). Wood d13C, d18O and radial growth responses of residual red pine to variable retention harvesting. *Tree Physiology*, 30, 326–334. doi: 10.1093/treephys/tpp119
- Regent Instruments Inc. (2009). WinDENDRO™ for tree-ring analysis. Quebec, Canada: Author.
- Rodríguez-Ortiz, G., González-Hernández, V. A., Aldrete, A., De los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011). Modelos para estimar crecimiento y eficiencia de crecimiento en plantaciones de *Pinus patula* en respuesta al aclareo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(3), 205–212. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v34n3/v34n3a12.pdf>
- Sánchez-Salguero, R., Linares, J. C., Camarero, J. J., Madrigal-González, J., Hevia, A., Sánchez-Miranda, A., ...Rigling, A. (2015). Disentangling the effects of competition and climate on individual tree growth: A retrospective and dynamic approach in Scots pine. *Forest Ecology and Management*, 358, 12–25. doi: 10.1016/j.foreco.2015.08.034
- Statistical Analysis Systems Institute (2014). The SAS system for windows, release 9.4. Cary, NC, USA: Author.
- Tomé, M., & Burkhart, H. E. (1989). Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science*, 35(3), 816–831. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/233645214_Distance-Dependent_Competition_Measures_for_Predicting_Growth_of_Individual_Trees
- Torres-Rojo, J. M. (2000). Sostenibilidad del volumen de cosecha calculado con el Método Mexicano de Ordenación de Montes. *Madera y Bosques*, 6(2), 57–72. doi: 10.21829/myb.2000.621335
- Von Oheimb, G., Lang, A. C., Bruelheide, H., Forrester, D. I., Wäsche, I., Yu, M., & Härdtle, W. (2011). Individual-tree radial growth in a subtropical broad-leaved forest: The role of local neighbourhood competition. *Forest Ecology and Management*, 261(3), 499–507. doi: 10.1016/j.foreco.2010.10.035
- Wanshngong, R. K., Thakuria, D., Sangma, C. B., Ram, V., & Bora, P. K. (2013). Influence of hill slope on biological pools of carbon, nitrogen, and phosphorus in acidic alfisols of citrus orchard. *CATENA*, 111, 1–8. doi: 10.1016/j.catena.2013.07.009