

Effect of fire and elevation on the regeneration of *Pinus hartwegii* Lindl. in northeastern Mexico

Efecto de los incendios y la elevación en la regeneración de *Pinus hartwegii* Lindl. en el noreste de México

Héctor E. Cortés-Cabrera¹; Enrique Jurado^{1*}; Marín Pompa-García²;
Oscar A. Aguirre-Calderón¹; Marisela Pando-Moreno¹; Marco A. González-Tagle¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional 145. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

²Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales. Río Papaloapan y bulevar Durango, col. Valle del Sur. C. P. 34120. Durango, México.

*Corresponding author: enrique_jurado@hotmail.com, tel.: +52 821 212 4895

Abstract

Introduction: Fire regimes and climate change affect the regeneration of vegetation, composition and abundance of species.

Objectives: To compare *P. hartwegii* regeneration and the number of trees with fire scars at different elevations; and determine whether regeneration is related to the density of adult trees and to the density of pine trees with fire evidence.

Materials and methods: *P. hartwegii* regeneration was studied at the altitudinal ranges 3 050, 3 225 and 3 400 m in the mountain El Potosí located in northeastern Mexico. Adult trees were sampled using the point-centered quarter method and saplings on square plots.

Results and discussion: Density of adult pine trees and seedlings was higher at the low elevations (3 050 and 3 225 m). Density of pine trees with fire scars was similar ($P > 0.05$) at the three elevations. No correlation was detected between regeneration and number of pine trees with fire scars, but there was a positive correlation between density of seedlings and that of adult pines

Conclusion: Altitude influences regeneration and density of *P. hartwegii* adult trees. Its regeneration is not related to fire evidence.

Keywords: density of pine trees; fire scars; altitudinal migration; El Potosí mountain.

Resumen

Introducción: Los regímenes de incendios y el cambio climático afectan la regeneración de la vegetación y la composición y abundancia de las especies.

Objetivos: Comparar la regeneración de *P. hartwegii* y el número de árboles con cicatrices por fuego a diferentes elevaciones; y determinar si la regeneración está relacionada con la densidad de árboles adultos y con la densidad de pinos con evidencias de incendio.

Materiales y métodos: La regeneración de *P. hartwegii* se investigó en los rangos altitudinales 3 050, 3 225 y 3 400 m en el cerro El Potosí ubicado en el noreste de México. Los individuos adultos fueron muestreados con el método de los cuadrantes centrados en un punto y los individuos jóvenes en parcelas cuadradas.

Resultados y discusión: La densidad de los pinos adultos y de las plántulas fue mayor en las elevaciones bajas (3 050 y 3 225 m). La densidad de pinos con cicatrices por fuego fue similar ($P > 0.05$) en las tres elevaciones. No se detectó correlación entre la regeneración y el número de pinos con cicatrices por fuego, pero sí hubo correlación positiva entre la densidad de plántulas y la de pinos adultos.

Conclusión: La altitud influye en la regeneración y densidad de adultos de *P. hartwegii*. Su regeneración no está relacionada con evidencias de incendio.

Palabras clave: densidad de pinos; cicatrices de fuego; migración altitudinal; cerro El Potosí.

Introduction

Regeneration is the way in which plants disperse and germinate in areas that have the right growth conditions (Baskin & Baskin, 1998). In an area affected by fire, germination and the establishment of seedlings depend on limiting factors such as water availability, temperature, light, density of seeds and predators (Baskin & Baskin, 1998). Many variables determine the frequency and intensity of forest fires, which, in turn, inhibit or promote the regeneration of conifers (Parro, Köster, Jogiste, & Vodde, 2009; Williams et al., 2013). Rising temperatures and droughts, after a fire, can inhibit the regeneration of some conifers and vary the composition and structure of the forest (Rother, Veblen, & Furman, 2015). In this context, Savage, Mast, and Feddema (2013) found that regeneration capacity decreases as periods of drought increase. It has also been reported that elevation and associated temperature affect plants regeneration in an important way (Chambers, Fornwalt, Malone, & Battaglia, 2016). On the other hand, because of the increase in temperature due to climate change, species are expected to migrate at higher elevations (Holtmeier & Broll, 2005).

In some regions and recent decades, fires have occurred more frequently (Williams et al., 2013). Fire affects the abundance of forest species and composition and structure of forests (Omi, 2005). Fire influences the age structure of tree populations and adult tree growth rings (Bosch, Giné, Ramadori, Bernat, & Gutiérrez, 1992).

In Mexico, the study of the effect of fires on pine regeneration is still underdeveloped. This study aims to contribute to the knowledge of the effect of altitudinal levels and fire regimes, for the conservation of *Pinus hartwegii* Lindl. natural areas on the highest mountain in northeastern Mexico. The mountain El Potosí is ideal for this study because of its altitudinal range and fire history. *Pinus hartwegii* presents fire adaptations, such as abundant post-fire regeneration, regrowth, protection due to its thick bark and foliage recovery (Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003). The objectives of the study were to compare *P. hartwegii* regeneration and the number of trees with fire scars at different elevations; and determine whether regeneration is related to the density of adult trees and density of pine trees with fire evidence.

Materials and methods

Research area

This study was conducted in the mountain El Potosí, in the Sierra Madre Oriental, Nuevo Leon, Mexico. El Potosí is the highest mountain (1 800 to 3 660 m) in

Introducción

La regeneración es la forma en la cual las plantas se dispersan y germinan en áreas que tienen las condiciones adecuadas para el crecimiento (Baskin & Baskin, 1998). En un área afectada por el fuego, la germinación y establecimiento de plántulas depende de factores limitantes como la disponibilidad de agua, temperatura, luz, densidad de semillas y depredadores (Baskin & Baskin 1998). Muchas variables determinan la frecuencia e intensidad de los incendios forestales, los cuales, a su vez, inhiben o promueven la regeneración de coníferas (Parro, Köster, Jogiste, & Vodde, 2009; Williams et al., 2013). Las temperaturas crecientes y las sequías, después de un incendio, pueden inhibir la regeneración de algunas coníferas y variar la composición y estructura del bosque (Rother, Veblen, & Furman, 2015). En este contexto, Savage, Mast, y Feddema (2013) encontraron que la capacidad de regeneración disminuye conforme los periodos de sequía incrementan. También se ha reportado que la elevación y la temperatura asociada afectan la regeneración de plantas de manera importante (Chambers, Fornwalt, Malone, & Battaglia, 2016). Por otra parte, debido al incremento de la temperatura por el cambio climático, se espera que las especies migren a mayores elevaciones (Holtmeier & Broll, 2005).

En algunas regiones y décadas recientes, los incendios han sido cada vez más frecuentes (Williams et al., 2013). El fuego afecta la abundancia de las especies forestales y la composición y estructura de los bosques (Omi, 2005). Asimismo, los incendios influyen en la estructura de edad de las poblaciones de árboles y los anillos de crecimiento de árboles adultos (Bosch, Giné, Ramadori, Bernat, & Gutiérrez, 1992).

En México, la investigación del efecto de los incendios en la regeneración de pinos es incipiente. En este trabajo pretendemos contribuir al conocimiento del efecto de los niveles altitudinales y regímenes de incendios, para la conservación de áreas naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. en la montaña más elevada del noreste de México. El cerro El Potosí es ideal para este estudio por su rango altitudinal e historial de incendios. *Pinus hartwegii* presenta adaptaciones al fuego, tales como regeneración abundante postincendio, capacidad de rebrote, protección debido a su gruesa corteza y recuperación del follaje (Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003). Los objetivos del estudio fueron comparar la regeneración de *P. hartwegii* y el número de árboles con cicatrices por fuego a diferentes elevaciones; y determinar si la regeneración está relacionada con la densidad de árboles adultos y con la densidad de pinos con evidencia de incendio.

northeastern Mexico (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 1986). The climates of the area are sub-humid and temperate sub-humid (García, Treviño-Garza, Cantú-Ayala, & González-Saldívar, 1999). The types of vegetation are temperate coniferous forest, mixed pine and oak forest, oak scrub, subalpine vegetation and alpine meadow at the top (García et al., 1999). The most common species are *Pinus culminicola* Andersen & Beaman, *P. ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schltld., *P. hartwegii*, *Populus tremuloides* Michx., *Abies vejari* Mart. and *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco (Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Kramer, & Akça, 2003). The distribution of *P. hartwegii* includes the gradient of 2,800 to 3,600 m, although it differs depending on the exposure, being narrower to the East (Aguirre-Calderón et al., 2003).

The fire has drastically affected vegetation in the study area. The last major fire occurred in 1998 (Ávila-Flores et al., 2014); subsequently, many mild forest fires have occurred. Those fires have left scars on tree trunks, which were used in this study as fire evidence.

Sampling

Sampling was conducted from April 2014 to May 2015. Five elevations in the range of species distribution were selected to determine the number of trees with fire evidence. Only stands larger than 400 m in length with less than 45° slope on the east side of El Potosí mountain were considered (walking on higher slopes requires special equipment). The size of the stands was defined regarding that they had at least 40 *P. hartwegii* adult trees. Only three elevations met the above criteria (3 050; 3 225 y 3 400 m). Stands were scarce and very small at 2 875 m. No specimens of the species were found at 3 575 m; a severe fire ended the populations of *P. hartwegii* and *P. culminicola* (Aguirre-Calderón et al., 2003). A total of five stands were selected at each of the three elevations. In each stand, 10 quarters were established centered on a point where *P. hartwegii* trees with a diameter at breast height (DBH) greater than 7.5 cm were measured. The point-centered quarter method consists of a series of points along a transect; each point represents the center of the imaginary quarter. The localized point is marked with a stake. Following the cardinal points, the area surrounding the sampling point is divided into four equal parts or quarters. In each quarter, we look for the tree closest to the central point (Cottam & Curtis, 1956; Mitchell, 2007).

A total of 200 trees were measured by elevation (600 in total), in which the distance from the tree to the central point, the number of trees with fire scars and the density of adult trees in the stand were determined. Regeneration was evaluated by establishing two square sampling sites of 75 m² in each stand; that is, 10 sites

Materiales y métodos

Área de investigación

El estudio se desarrolló en el cerro El Potosí, en la Sierra Madre Oriental del estado de Nuevo León, México. El Potosí es la montaña más alta (1 800 a 3 660 m) en el noreste de México (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 1986). Los climas del área son semifrío subhúmedo y templado subhúmedo (García, Treviño-Garza, Cantú-Ayala, & González-Saldívar, 1999). Los tipos de vegetación presentes son bosque templado de coníferas, bosque mixto de pino y encino, matorral de encino, vegetación subalpina y pradera alpina en la cima (García et al., 1999). Las especies más comunes son *Pinus culminicola* Andersen & Beaman, *P. ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schltld., *P. hartwegii*, *Populus tremuloides* Michx., *Abies vejari* Mart. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco (Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Kramer, & Akça, 2003). La distribución de *P. hartwegii* comprende el gradiente de 2 800 a 3 600 m, aunque difiere dependiendo de la exposición, siendo más estrecho hacia el este (Aguirre-Calderón et al., 2003).

El fuego ha afectado drásticamente la vegetación del área de estudio. El último incendio de gran intensidad ocurrió en 1998 (Ávila-Flores et al., 2014); posteriormente, muchos incendios de intensidad media han ocurrido. Estos han dejado cicatrices en los troncos de los árboles, las cuales se emplearon en este estudio como evidencia del fuego.

Muestreo

El muestreo se realizó de abril de 2014 a mayo de 2015. Cinco elevaciones en el rango de distribución de la especie se seleccionaron para determinar el número de árboles con evidencia de fuego. Solo se consideraron rodales mayores de 400 m de longitud con pendiente menor de 45° en la cara este del cerro El Potosí (caminar en pendientes mayores requiere equipo especial). El tamaño de los rodales se definió considerando que tuvieran al menos 40 árboles adultos de *P. hartwegii*. Únicamente tres elevaciones cumplieron con los criterios mencionados (3 050, 3 225 y 3 400 m). A 2 875 m, los rodales eran escasos y muy pequeños. A 3 575 m, no se encontraron ejemplares de la especie; un incendio severo acabó con las poblaciones de *P. hartwegii* y *P. culminicola* (Aguirre-Calderón et al., 2003). En cada una de las tres elevaciones se seleccionaron cinco rodales. En cada rodal se establecieron 10 cuadrantes centrados en un punto en los que se midieron los árboles de *P. hartwegii* con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor de 7.5 cm. El método de cuadrantes centrados en un punto consiste en una serie de puntos a lo largo de un transecto; cada punto representa el centro del

per elevation. In each site, all small trees of *P. hartwegii* were measured, regarding the newly saplings and those with a diameter at breast height smaller than 7.5 cm. In each sapling, the number of whorls was determined to estimate the age (each whorl represents one year).

Data analysis

The response variables were tree density, density of trees with fire scars and density of saplings. Tests were carried out to determine the correlation between the number of burned trees and saplings, and between density of adult trees and saplings. In addition to that, analysis of variance were developed to determine differences in the number of trees burned and regeneration at different elevations. The data was analyzed using R 2.15.0 (R Development Core Team, 2010); normality tests were performed with Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov, developing, in agreement, the Pearson correlation analyzes. The data that did not meet the normal distribution criteria were analyzed with Kruskal-Wallis.

Results and Discussion

The number of *P. hartwegii* trees with fire scars was similar between elevations ($P = 0.051$). There were 10 to 15 trees (25 and 37 %) with fire scars at each sampled point. Figure 1 shows that there was greater variability in the number of trees with fire scars at an altitude of 3 225 m, since the standard error is larger at 3,050 and 3 400 m.

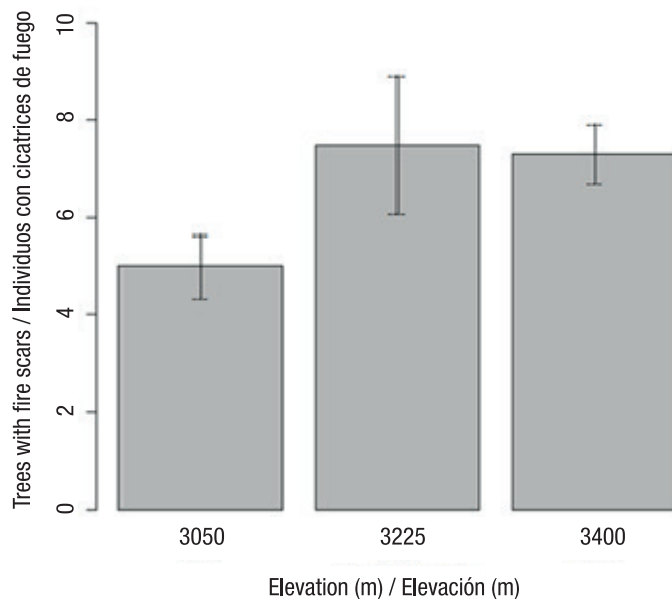


Figure 1. Number of *Pinus hartwegii* trees with fire scars at three elevations sampled on the east side of the mountain El Potosí, Mexico. Means were statistically similar ($F = 4.16$, $df = 28$, $P = 0.051$). Standard error of the mean is represented on the bars.

Figura 1. Número de individuos de *Pinus hartwegii* con cicatrices por fuego en las tres elevaciones muestreadas en el lado este del cerro El Potosí, México. Las medias fueron similares estadísticamente ($F = 4.16$, $gl = 28$, $P = 0.051$). Sobre las barras se representa el error estándar de la media.

cuadrante imaginario. El punto localizado se señala con una estaca. Siguiendo los puntos cardinales, la zona que rodea al punto de muestreo se divide en cuatro partes iguales o cuadrantes. En cada cuadrante se busca el árbol más cercano al punto central (Cottam & Curtis, 1956; Mitchell, 2007).

Doscientos árboles se midieron por elevación (600 en total), en la cual se determinaron la distancia del árbol al punto central, el número de árboles con cicatrices por fuego y la densidad de árboles adultos en el rodal. La regeneración se evaluó estableciendo dos sitios cuadrados de muestreo de 75 m² en cada rodal; es decir, 10 sitios por elevación. En cada sitio se midieron todos los árboles pequeños de *P. hartwegii*, considerando los recién germinados y los de diámetro normal menor de 7.5 cm. En cada planta joven se determinó el número de verticilos para estimar la edad (cada verticilo representa un año).

Análisis de datos

Las variables de respuesta fueron densidad de árboles, densidad de árboles con cicatrices por fuego y densidad de plantas jóvenes. Se realizaron pruebas para determinar la correlación entre el número de árboles quemados y renuevos, y entre la densidad de árboles adultos y renuevos. Adicionalmente se desarrollaron análisis de varianza para determinar diferencias en el número de árboles incendiados y en la regeneración a diferentes elevaciones. Los datos se analizaron empleando el paquete R version 2.15.0 (R Development

Figure 2 shows that regeneration varied with the elevation ($P < 0.001$); more saplings were counted ($3,000 \text{ individuals}\cdot\text{ha}^{-1}$) at the lowest elevation than at the largest (533 and $667 \text{ trees}\cdot\text{ha}^{-1}$). On the other hand, no correlation was observed between saplings and the number of trees with fire scars ($r^2 = 0.32$, $P > 0.05$).

The regeneration of the population after fires can be affected by precipitation and temperature (Han, Shen, Ying, Li, & Chen, 2015). In the case of *P. hartwegii* communities, Rodríguez-Trejo (2001) indicated that light and moderate fires promote regeneration. This contrasts with the results, since no direct relationship was found between the evidence of low and medium intensity fires with regeneration. In post-fire regeneration studies, the density of *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson seedlings was higher near the line of surviving trees (Chambers et al., 2016). Christopoulou et al. (2014) also found greater regeneration of *P. nigra* Arnold near unburned areas. In our study, there was no regeneration of *P. hartwegii* or any other woody species in areas where trees survived the fire. Probably, soils burned after severe fires can be the cause of the absence of regeneration (Vacchiano et al., 2014).

Core Team, 2010); las pruebas de normalidad se realizaron con Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov, desarrollando, en concordancia, los análisis de correlación de Pearson. Los datos que no cumplieron los criterios de distribución normal se analizaron mediante Kruskal-Wallis.

Resultados y discusión

El número de árboles de *P. hartwegii* con cicatrices por fuego fue similar entre elevaciones ($P = 0.051$). En cada punto muestreado hubo de 10 a 15 individuos (25 y 37 %) con cicatrices por fuego. En la Figura 1 se aprecia que hubo mayor variabilidad en el número de árboles con cicatrices de fuego a una altitud de 3 225 m, ya que el error estándar es más grande que en las elevaciones de 3 050 y 3 400 m.

La Figura 2 muestra que la regeneración varió con la elevación ($P < 0.001$); se contabilizaron más renuevos ($3\ 000 \text{ individuos}\cdot\text{ha}^{-1}$) en la elevación menor que en las mayores (533 y $667 \text{ individuos}\cdot\text{ha}^{-1}$). Por otra parte, no se detectó correlación entre los renuevos y el número de árboles con cicatrices de fuego ($r^2 = 0.32$, $P > 0.05$).

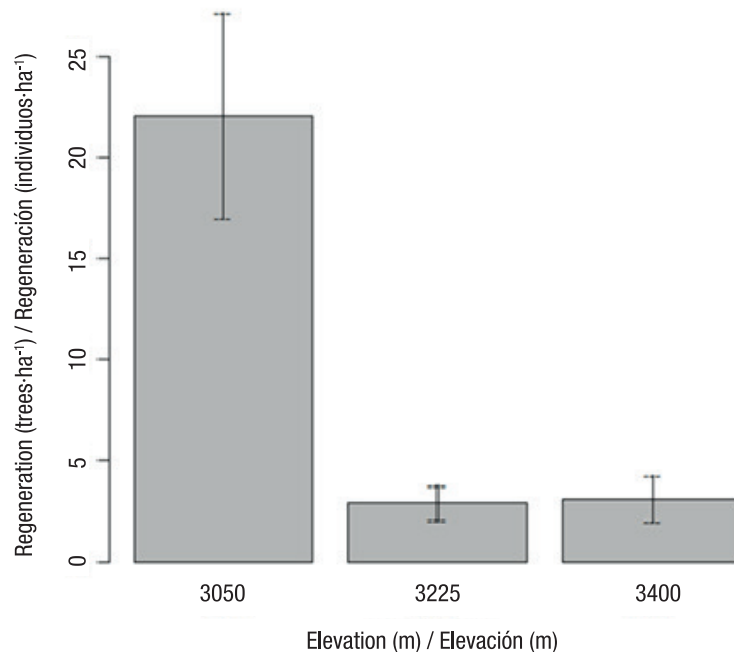


Figure 2. Density of saplings (diameter at breast height < 7.5 cm) of *Pinus hartwegii* at three elevation categories (Kruskal-Wallis, Chi-square = 14.82, df = 2, $P < 0.001$). Standard error of the mean is represented on the bars.

Figura 2. Densidad de individuos jóvenes (diámetro normal < 7.5 cm) de *Pinus hartwegii* en tres categorías de elevación (Kruskal-Wallis, Chi-cuadrada = 14.82, gl = 2, $P < 0.001$). Sobre las barras se representa el error estándar de la media.

With respect to adult trees, density was different among elevations ($P = 0.002$). Figure 3 shows that density was higher at lower altitude (3 050 m). The distribution of *P. hartwegii* in the mountain El Potosí has been considerably reduced; now, most remain in what was previously their intermediate elevation, with few trees at the lower elevation and none at the higher elevations. These results agree with the prediction that *P. hartwegii* can lose 80 % of its current distribution by the year 2050 (Gutiérrez & Trejo, 2014). In the case of other conifers, *P. ponderosa* regeneration is abundant at higher elevations (Chambers et al., 2016), compared to *P. hartwegii*. Petrie, Wildeman, Bradford, Hubbard, and Lauenroth (2016) found that *P. ponderosa* and *P. contorta* Douglas regeneration was greater in areas with temperatures between 20 and 25 °C, at the lower end of the species distribution. This contrasts with the results of Rother et al. (2015), who pointed out that *P. ponderosa* and *P. menziesii* regeneration was inhibited at lower elevations, due to drought and high temperatures attributed to global warming. Erickson, Nitschke, Coops, Cumming, and Stenhouse (2015) found a remarkable decrease in the right conditions for the regeneration of tree species in Alberta, Canada. In this study, *P. hartwegii* regeneration was greater at the lower elevation, so migration towards higher elevations may not occur, due to the potential decrease of germplasm and inadequate soil conditions caused by the fires.

La regeneración de la población después de los incendios puede verse afectada por la precipitación y la temperatura (Han, Shen, Ying, Li, & Chen, 2015). En el caso de las comunidades de *P. hartwegii*, Rodríguez-Trejo (2001) indicó que los incendios ligeros y moderados promueven la regeneración. Lo anterior contrasta con los resultados, ya que no se encontró relación directa entre la evidencia de fuegos de baja y mediana intensidad con la regeneración. En estudios de regeneración postincendio, la densidad de plántulas de *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson fue mayor cerca de la línea de los árboles sobrevivientes (Chambers et al., 2016). Christopoulou et al. (2014) también encontraron mayor regeneración de *P. nigra* Arnold cerca de las áreas no incendiadas. En nuestro estudio no hubo regeneración de *P. hartwegii* o de alguna otra especie leñosa en áreas donde los árboles sobrevivieron al incendio. Probablemente, los suelos quemados después de incendios severos pueden ser la causa de la ausencia de regeneración (Vacchiano et al., 2014).

Con respecto a los individuos adultos, la densidad fue diferente entre las elevaciones ($P = 0.002$). La Figura 3 muestra que la densidad fue mayor en la altitud más baja (3 050 m). La distribución de *P. hartwegii* en el cerro El Potosí se ha reducido considerablemente; ahora, la mayor parte permanece en lo que antes era su elevación intermedia, con pocos individuos en la elevación menor y ninguno en las elevaciones mayores. Estos resultados

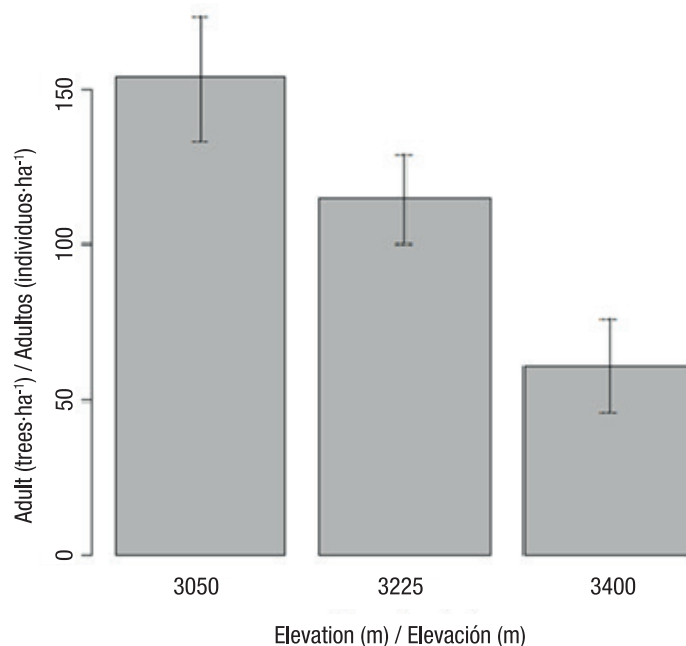


Figure 3. Densities of adult trees (DBH > 7.5 cm) of *Pinus hartwegii* at three elevation categories. The densities differed among the three elevation categories ($F = 7.55$, $df = 27$, $P = 0.002$).

Figura 3. Densidades de individuos adultos (DAP > 7.5 cm) de *Pinus hartwegii* en tres categorías de elevación. Las densidades difirieron entre las tres categorías de elevación ($F = 7.55$, $gl = 27$, $P = 0.002$).

The density of adult trees and saplings were positively correlated (Figure 4) but with a high dispersion of data ($r^2 = 0.43$, $P = 0.017$). Most of the saplings found at the lowest elevation were less than 4 years old (Figure 5).

conducen a la predicción de que *P. hartwegii* puede perder 80 % de su distribución actual para el año 2050 (Gutiérrez & Trejo, 2014). En el caso de otras coníferas, la regeneración de *P. ponderosa* es abundante a elevaciones

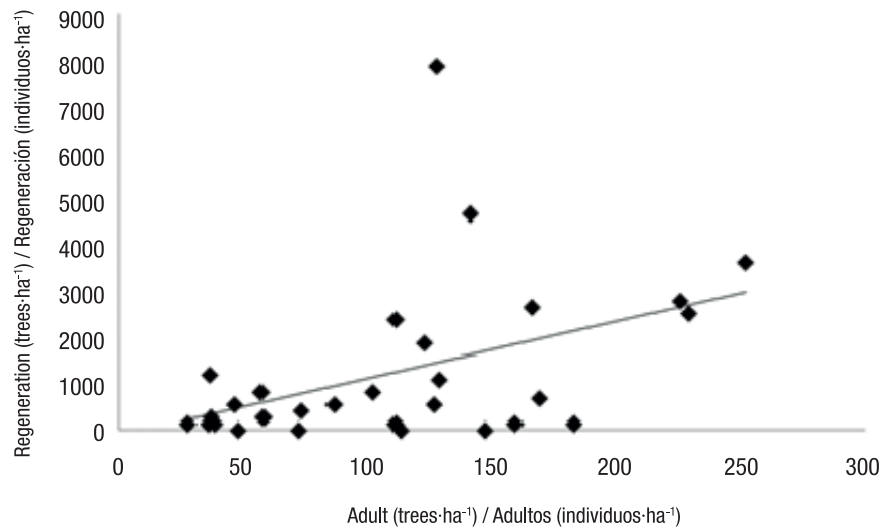


Figure 4. Density of adult trees and regeneration of *Pinus hartwegii*. Regeneration was higher when density of adult trees was higher ($r^2 = 0.43$, $df = 27$, $P = 0.017$).

Figura 4. Densidad de individuos adultos y regeneración de *Pinus hartwegii*. La regeneración fue más alta cuando la densidad de árboles adultos fue mayor ($r^2 = 0.43$, $gl = 27$, $P = 0.017$).

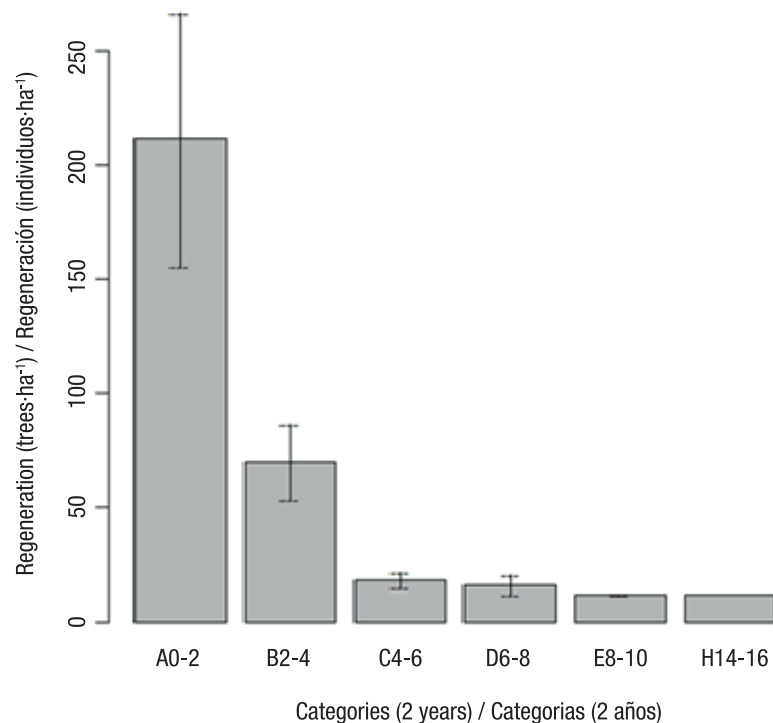


Figure 5. Density of *Pinus hartwegii* saplings by age category at 3050 m elevation (Kruskal-Wallis, Chi-cuadrada= 20.1, $df = 5$, $P < 0.001$). The age of regeneration was divided into categories by two-year segments to be compared with each other.

Figura 5. Densidad de renuevos de *Pinus hartwegii* por categoría de edad a 3050 m de elevación (Kruskal-Wallis, Chi-cuadrada= 20.1, $gl = 5$, $P < 0.001$). La edad de regeneración se dividió en categorías por segmentos de dos años para ser comparadas entre sí.

An abundant vegetation cover in areas with high tree density can contribute to regeneration (Kemp, Higuera, & Morgan, 2016), due to a delay in evaporation (Vacchiano et al., 2014). This coincides with the results of our study, since higher regeneration was found at sites with higher tree density. However, other authors have found greater survival after forest thinning (Man, Rice, & MacDonald, 2009). Perhaps this is relevant in high density stands and not in our study area, where natural vegetation is not very dense.

Conclusions

Regeneration of *Pinus hartwegii* showed no relationship with the fire evidence found. The number of trees with fire scars was similar at the sampled elevations. Density of saplings was higher at the lower elevation and in places with higher density of adult trees. This study contributes to the knowledge of the effect of altitude and fires in *Pinus hartwegii* regeneration in the northeast of Mexico.

Acknowledgments

Funding was awarded by PAICYT (Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica) and CONACYT (CB-2015-01 255453). I Reta y JC Flores supported the field work.

End of English version

References / Referencias

- Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Kramer, H., & Akça, A. (2003). Análisis estructural de ecosistemas forestales en el Cerro del Potosí, Nuevo León, México *Ciencia UANL*, 6(2), 219–225. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/1220/1/analisisecosistemas.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1986). *Síntesis geográfica del estado de Nuevo León*. México: Autor. Retrieved from http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220747/702825220747_1.pdf
- Ávila-Flores, D. Y., González-Tagle, M. A., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., & Vargas-Larreta, B. (2014). Dendrochronopyrology: analysis of the morphological evidence of forest fires. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(21), 136–147. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322014000100010&script=sci_arttext&tlng=en
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (1998). *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. San Diego, USA: Academic Press.
- Bosch, O., Giné, L., Ramadori, E. D., Bernat, A., & Gutiérrez, E. (1992). Disturbance, age and size structure in stands

mayores (Chambers et al., 2016), en contraste con *P. hartwegii*. Por su parte, Petrie, Wildeman, Bradford, Hubbard, y Lauenroth (2016) encontraron que la regeneración de *P. ponderosa* y *P. contorta* Douglas fue mayor en áreas con temperaturas entre los 20 y 25 °C, en el extremo más bajo de la distribución de la especie. Esto contrasta con los resultados de Rother et al. (2015), quienes señalaron que la regeneración de *P. ponderosa* y *P. menziesii* se inhibió en elevaciones más bajas, debido a la sequía y a las temperaturas altas atribuidas al calentamiento global. Erickson, Nitschke, Coops, Cumming, y Stenhouse (2015) encontraron notable disminución en las condiciones adecuadas para la regeneración de especies de árboles en Alberta, Canadá. En el presente estudio, la regeneración de *P. hartwegii* fue mayor en la elevación menor, por lo que quizá no ocurra una migración hacia elevaciones mayores, debido a la disminución potencial de germoplasma y a las condiciones inadecuadas de suelo causadas por los incendios.

La densidad de individuos adultos y renuevos estuvieron correlacionados positivamente (Figura 4) pero con una alta dispersión de datos ($r^2=0.43$, $P=0.017$). La mayoría de los renuevos encontrados en la elevación más baja tuvieron menos de 4 años (Figura 5).

Una cobertura vegetal abundante en áreas con densidad alta de árboles puede contribuir a la regeneración (Kemp, Higuera, & Morgan, 2016), debido a un retraso en la evaporación (Vacchiano et al., 2014). Esto coincide con los resultados de nuestro estudio, ya que se encontró mayor regeneración en los sitios con mayor densidad de árboles. No obstante, otros autores han encontrado mayor sobrevivencia después del raleo forestal (Man, Rice, & MacDonald, 2009). Quizá esto último sea relevante en rodales de alta densidad y no en nuestra área de estudio, donde la vegetación natural no es muy densa.

Conclusiones

La regeneración de *Pinus hartwegii* no mostró relación con las evidencias de incendio encontradas. El número de árboles con cicatrices de incendio fue similar en las elevaciones muestreadas. La densidad de plantas jóvenes fue mayor en la elevación más baja y en lugares con mayor densidad de individuos adultos. Este trabajo contribuye al conocimiento del efecto de altitud e incendios en la regeneración de *Pinus hartwegii* en el noreste de México.

Agradecimientos

El financiamiento fue otorgado por PAICYT (Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica) y CONACYT (CB-2015-01 255453). I Reta y JC Flores apoyaron en el trabajo de campo.

Fin de la versión en español

- of *Pinus uncinata* Ram. *Pirineos*, 140, 5–14. doi: 10.3989/pirineos.1992.v140.168
- Chambers, M. E., Fornwalt, P. J., Malone, S. L., & Battaglia, M. A. (2016). Patterns of conifer regeneration following high severity wildfire in ponderosa pine-dominated forests of the Colorado Front Range. *Forest Ecology and Management*, 378, 57–67. doi: 10.1016/j.foreco.2016.07.001
- Christopoulou, A., Fyllas, N. M., Andriopoulos, P., Koutsias, N., Dimitrakopoulos, P. G., & Arianoutsou, M. (2014). Post-fire regeneration patterns of *Pinus nigra* in a recently burned area in Mount Taygetos, Southern Greece: The role of unburned forest patches. *Forest Ecology and Management*, 327, 148–156. doi: 10.1016/j.foreco.2014.05.006
- Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37(3), 451–460. doi: 10.2307/1930167
- Erickson, A., Nitschke, C., Coops, N., Cumming, S., & Stenhouse, G. (2015). Past-century decline in forest regeneration potential across a latitudinal and elevational gradient in Canada. *Ecological Modelling*, 313, 94–102. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2015.06.027
- García, A. M. A., Treviño-Garza, E. J., Cantú-Ayala, C. M., & González-Saldívar, F. N. (1999). Zonificación ecológica del cerro “El Potosí”, Galeana, Nuevo León, México. *Investigaciones Geográficas*, 38, 31–40. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n38/n38a4.pdf>
- Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179–188. doi: 10.7550/rmb.37737
- Han, J., Shen, Z., Ying, L., Li, G., & Chen, A. (2015). Early post-fire regeneration of a fire-prone subtropical mixed Yunnan pine forest in Southwest China: Effects of pre-fire vegetation, fire severity and topographic factors. *Forest Ecology and Management*, 356, 31–40. doi: 10.1016/j.foreco.2015.06.016
- Holtmeier, F. K., & Broll, G. (2005). Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography*, 14(5), 395–410. doi: 10.1111/j.1466-822X.2005.00168.x
- Kemp, K. B., Higuera, P., & Morgan, P. (2016). Fire legacies impact conifer regeneration across environmental gradients in the US northern Rockies. *Landscape Ecology*, 31(3), 619–636. doi: 10.1007/s10980-015-0268-3
- Man, R., Rice, J. A., & MacDonald, G. B. (2009). Long-term response of planted conifers, natural regeneration, and vegetation to harvesting, scalping, and weeding on a boreal mixed wood site. *Forest Ecology and Management*, 258(7), 1225–1234. doi: 10.1016/j.foreco.2009.06.012
- Mitchell, K. (2007). *Quantitative analysis by the point-centered quarter method*. Geneva, NY: Hobart and William Smith Colleges. Retrieved from <http://arxiv.org/pdf/1010.3303.pdf>
- Omi, P. N. (2005). *Forest fires: A reference handbook*. Santa Barbara, CA, USA: ABC-CLIO.
- Parro, K., Köster, K., Jogiste, K., & Vodde, F. (2009). Vegetation dynamics in a fire damaged forest area: the response of major ground vegetation species. *Baltic Forestry*, 15(2), 206–215. Retrieved from [https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2009-15\[2\]/206_215%20Parro%20et%20al.pdf](https://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2009-15[2]/206_215%20Parro%20et%20al.pdf)
- Petrie, M. D., Wildeman, A. M., Bradford, J. B., Hubbard, R. M., & Lauenroth, W. K. (2016). A review of precipitation and temperature control on seedling emergence and establishment for ponderosa and lodgepole pine forest regeneration. *Forest Ecology and Management*, 361, 328–338. doi: 10.1016/j.foreco.2015.11.028
- R Development Core Team (2010). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2001). Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2), 145–151. Retrieved from <https://chapingo.mx/revistas/revistas/articulos/doc/rchscaVII357.pdf>
- Rodríguez-Trejo, D. A., & Fulé, P. Z. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire*, 12(1), 23–37. Retrieved from <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Rodriguez-y-Fule-2003.pdf>
- Rother, M. T., Veblen, T. T., & Furman, L. G. (2015). A field experiment informs expected patterns of conifer regeneration after disturbance under changing climate conditions. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(11), 1607–1616. doi: 10.1139/cjfr-2015-0033
- Savage, M., Mast, J. N., & Feddema, J. J. (2013). Double whammy: high-severity fire and drought in ponderosa pine forests of the Southwest. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(6), 570–583. doi: 10.1139/cjfr-2012-0404
- Vacchiano, G., Stanchi, S., Marinari, G., Ascoli, D., Zanini, E., & Motta, R. (2014). Fire severity, residuals and soil legacies affect regeneration of Scots pine in the Southern Alps. *Science of the Total Environment*, 472, 778–788. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.101
- Williams, A. P., Allen, C. D., Macalady, A. K., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., ...McDowell, N. G. (2013). Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 3(3), 292–297. doi: 10.1038/nclimate1693