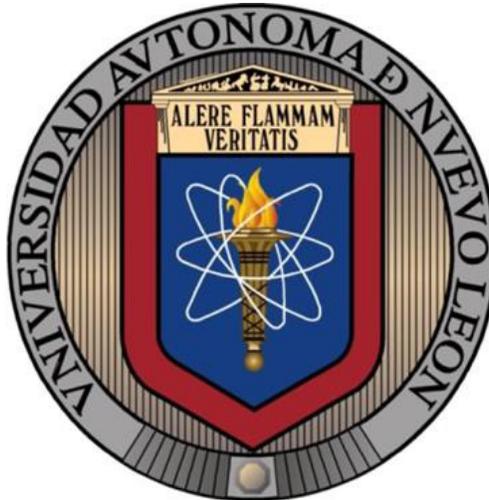


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**ESTRUCTURA DE EDADES, DENSIDAD Y REGENERACIÓN DE
Pinus hartwegii EN UN GRADIENTE DE ELEVACIÓN**

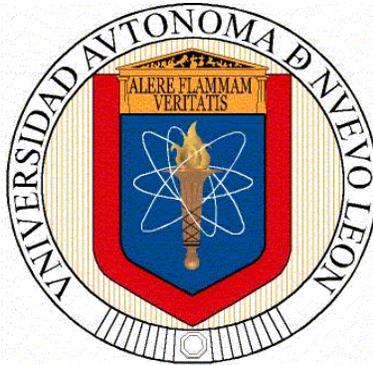
PRESENTA

MC. HÉCTOR ENRIQUE CORTÉS CABRERA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

AGOSTO, 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**ESTRUCTURA DE EDADES, DENSIDAD Y REGENERACIÓN DE *Pinus hartwegii* EN
UN GRADIENTE DE ELEVACIÓN**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

MC. HÉCTOR ENRIQUE CORTÉS CABRERA

Dr. Enrique Jurado Ybarra
DIRECTOR

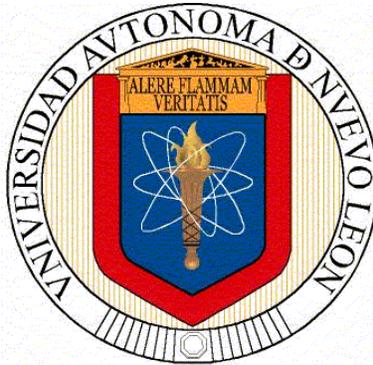
Dr. Oscar Aguirre Calderón
ASESOR

Dra. Marisela Pando Moreno
ASESOR

Dr. Marco Aurelio González Tagle
ASESOR

Dr. Marín Pompa García
DIRECTOR EXTERNO

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**ESTRUCTURA DE EDADES, DENSIDAD Y REGENERACIÓN DE *Pinus hartwegii* EN
UN GRADIENTE DE ELEVACIÓN**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA
MC. HÉCTOR ENRIQUE CORTÉS CABRERA**

Dr. Enrique Jurado Ybarra
DIRECTOR

Dr. Marín Pompa García
DIRECTOR EXTERNO

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Capítulo 2	3
Regeneración de <i>Pinus hartwegii</i> y su relación con el fuego en un gradiente altitudinal	3
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	5
MATERIALES Y METODOS	7
Área de estudio.....	7
Muestreo	7
Análisis	8
RESULTADOS	8
DISCUSIÓN	12
Post incendio.....	12
Elevación	14
Cobertura	14
CONCLUSIONES	15
Capítulo 3	16
Estructura de población y densidad de <i>Pinus hartwegii</i> en un gradiente de elevación	16
RESUMEN	16

INTRODUCCIÓN	18
MATERIALES Y MÉTODOS	19
Área de estudio.....	19
Muestreo	20
Análisis	21
RESULTADOS	21
DISCUSIÓN	28
CONCLUSIONES	29
LITERATURA CITADA	30
Regeneration of <i>Pinus hartwegii</i> and its relation with fire in an elevation gradient	40
Keywords:.....	40
Abstract	40
Introduction	41
Materials and methods	42
Study area	42
Sampling	43
Data analysis.....	44
Results	44
Discussion	45
Post fire regeneration.....	45
Elevation	46
Cover	47
Conclusions	47
References	47
Figures	55
Observaciones	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de individuos con cicatrices (Medias \pm es) en las tres elevaciones muestreadas en el lado este del Cerro El Potosí.....	9
Figura 2.. Densidad de individuos jóvenes (DN < 7.5 cm) en tres categorías de elevaciones.....	10
Figura 3. Densidades de individuos adultos (DN > 7.5 cm) en las tres elevaciones	10
Figura 4. Dispersion de puntos de densidad de individuos adultos y densidad de regeneracion.....	11
Figura 5. Comparación de la densidad de regeneración por categoría de edad de la elevación 3050	12
Figura 1. muestras de núcleos tomadas con el taladro de pressler a la altura de pecho.....	21
Figura 2. Densidad de categorías de edad (media \pm se) para la elevación 3050 msnm.....	22
Figura 3. Densidad de categorías de edad (media \pm se) para la elevación 3225 msnm.....	23
Figura 4. Densidad de las categorías de edad (media \pm se) para la elevación 3400 msnm.....	24
Figura 5 Densidades de las categorías de edades (media \pm se) en las tres elevaciones.....	25
Figura 6. Correlaciones de edad entre DAP de <i>Pinus hartwegii</i> en tres elevaciones en el Cerro El Potosí.....	26
Figura 7. Correlaciones de edad entre Altura de <i>Pinus hartwegii</i> en tres elevaciones en el Cerro El Potosí.....	27

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Enrique Jurado, Director de esta investigación, por su gran apoyo y comprensión.

Al Dr. Marín Pompa García, Director externo de esta investigación, por sus aportaciones y comentarios que enriquecieron este documento.

Al Dr. Oscar Aguirre Calderón, Dra. Marisela Pando y al Dr. Marco Aurelio Tagle, como parte del comité de tesis, por sus aportes y comentarios en la realización de esta investigación.

Al Programa de Apoyo a la investigación Científica y Tecnológica (Paicyt, 255453) por su apoyo y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt, 371617) por la beca otorgada, sin la cual la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

A la Facultad de Ciencias Forestales por el apoyo para la realización de los estudios de posgrado.

A todas aquellas personas que formaron parte directa o indirecta en la realización de esta investigación, principalmente a quienes ayudaron en campo: Indira Reta, Diana Arredondo, Juan Carlos Flores y Luis Eduardo Castillo.

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Se espera que la regeneración se vea beneficiada por el aumento de las temperaturas, y que las plantas migren a mayores elevaciones siguiendo la migración de las temperaturas (Parmesan & Yohe, 2003; Root et al., 2003; Fenner y Thompson, 2005; Holtmeier et al., 2005). Las principales variables que afectan la regeneración son la disponibilidad de agua, la temperatura adecuada y la aireación del suelo (Benech et al., 2004; Fenner y Thompson 2005; Baskin y Baskin, 2001). Chamber et al. (2016) encontraron que la temperatura es de gran importancia para la regeneración. Pero existen otras como el fuego, que modifican de manera considerable la composición del bosque y a su vez afectan la regeneración en años posteriores (Brown et al., 2011; Williams et al., 2013). En algunas áreas se ha encontrado que la regeneración de *Pinus hartwegii* posterior a un incendio se ve beneficiada (Rodríguez & Fulé, 2003).

Se pronostica que se generará un aumento de la frecuencia de los incendios debido al aumento de las temperaturas (Williams et al 2013) pero Omi (2005) menciona que este fenómeno podría ser al contrario en algunas áreas. El fuego tiene un gran efecto en los ecosistemas, cambiando la estructura del bosque (Omi, 2005). Los fenómenos naturales quedan registrados en la estructura del bosque y en el crecimiento de los anillos de los árboles (Bosch et al., 1992; Omi, 2005; Stoffel, 2010). Los cambios en la estructura podrían ser vistos mediante una determinación de estructura de edades, esto mediante el conteo y medición de los anillos de crecimiento (Génova y Martínez, 2016).

La información sobre densidades y estructuras son altamente relevantes para el manejo restauración y conservación de los bosques (Hagmann et al., 2014). Es necesario comprender mejor la relación entre el aumento de las temperaturas y el efecto que estas pueden provocar a la germinación y el establecimiento de plántulas, así como del efecto de los regímenes de incendios, para poder predecir el desplazamiento de las especies vegetales en el cambio de

su distribución y poder realizar planes de manejo y conservación adecuados (Haire & McGarigal, 2008; Smith et al., 2009).

Objetivo general

- Conocer el impacto que tiene y que han tenido a lo largo del tiempo los incendios sobre la regeneración de *Pinus hartwegii*, así como conocer los efectos de la elevación sobre la misma.

Objetivos específicos

- Conocer la relación entre regeneración y cicatrices del fuego en árboles adultos.
- Conocer la relación de la regeneración y la evidencia del fuego en las diferentes elevaciones.
- Determinar si existen diferencias entre la densidad de individuos de *Pinus hartwegii* entre las edades (en categorías de 20 años) en cada uno de las elevaciones.
- investigar si existe diferencia entre la densidad de las categorías de edad y las elevaciones.

Capítulo 2

Regeneración de *Pinus hartwegii* y su relación con el fuego en un gradiente altitudinal

RESUMEN

La regeneración es afectada directamente por condiciones ambientales tales como la luz, disponibilidad de agua y fuegos entre otras variables. Dichas condiciones afectan los patrones de regeneración y estos patrones a su vez afectan la composición y abundancia de los bosques, dichos cambios quedan registrados en la estructura de edades de los bosques y a través del crecimiento de anillos de los árboles adultos. Debido a la migración altitudinal de las temperaturas de acuerdo a pronósticos de cambio climático, se espera que las especies migren junto con las temperaturas a mayores elevaciones. Nosotros comparamos la regeneración de *Pinus hartwegii* en el gradiente de elevación de la especie (3050, 3225 y 3400 msnm), y comparamos el número de individuos adultos con cicatriz y la regeneración. La regeneración fue muestreada en parcelas, mientras que los adultos fueron muestreados por el método de punto cuadrante. La densidad de los individuos adultos y la regeneración fueron mayores en menores elevaciones. No se encontró correlación entre regeneración y el número de individuos con cicatriz, pero una correlación positiva fue encontrada entre la densidad de individuos adultos y la regeneración.

ABSTRACT

Regeneration is directly affected by environmental conditions such as light, water availability and fires among other variables. These conditions affect regeneration patterns and patterns in turn affect the composition and abundance of forests, these changes are recorded in the age structure of the forest and through the growth tree-rings of adult trees. Due to the altitudinal migration of temperatures according to forecasts of climate change, it is expected that species will migrate along with the temperatures to higher elevations. We compared the regeneration of *Pinus hartwegii* in the elevation gradient of the species (3,050, 3,225 y 3400m in elevation), and compared the number of adult individuals with fire scars and regeneration. Regeneration was sampled in plots, while adult individuals were sampled by the point centered quarter method. Density of adult individuals and regeneration were higher at lower elevations, while individuals with fire scars showed similar density across elevations. No correlation was detected between regeneration and the number of plants with fire scars, but a positive correlation was found between the density of adult individuals and regeneration.

INTRODUCCIÓN

La regeneración es el medio por el cual las plantas se mueven y germinan en aquellos lugares donde las condiciones son adecuadas para su crecimiento (Harper, 1978; Baskin & Baskin, 2001; Fenner & Thompson, 2005). Regeneración en áreas que han sido afectadas por los incendios dependen de una gran cantidad de factores limitantes tales como disponibilidad de agua, temperatura, luz, disponibilidad de semillas y depredadores de semillas (Harper, 1978; Baskin & Baskin, 2001; Rooney et al., 2002; Benech *et al.*, 2004; Fenner & Thompson, 2005). Muchas variables influyen en la frecuencia y la intensidad de los incendios forestales (Kollmann et al., 2008; Brown et al., 2011) y estos a su vez pueden promover o inhibir la regeneración (Hidalgo, 2003).

Las condiciones ambientales post incendio tienen un efecto sobre los patrones de regeneración (Bonnet et al., 2005). Para algunas coníferas las temperaturas crecientes y las altas temperaturas pueden inhibir la regeneración después de un incendio, así que la composición y estructura del bosque puede cambiar (Bonnet et al., 2005; Rother et al., 2015). Savage et al. (2013) encontraron que la habilidad de regenerarse es menor con el incremento de periodos de sequía. La elevación y su temperatura asociada, afecta en gran medida la regeneración de las plantas (Viveros & Viveros, 2009; Chamber et al., 2016). Debido a la migración altitudinal de las temperaturas, de acuerdo a los pronósticos de cambio climático, se espera que las especies migre junto con las temperaturas a elevaciones más altas (Parmesan & Yohe, 2003; Root et al., 2003; Holtmeier et al., 2005).

El fuego afecta la composición y abundancia de los bosques (Brown et al., 2011; Williams et al., 2013), y en algunas regiones los fuegos han sido más frecuentes en las recientes décadas (Williams et al 2013). Algunos autores encontraron una relación entre el aumento de las temperaturas y el incremento de la frecuencia de incendios (McKenzie et al., 2004). En las próximas décadas la

actividad de incendios puede disminuir en algunas áreas, pero aumentar en otras según algunos pronósticos (Omi, 2005). Otros autores aseguran que el cambio climático no determina directamente el régimen del fuego, por que otras variables involucradas tienen mayor influencia (Keeley & Syphard, 2016; Littell et al., 2016). Entre las variables involucradas en el fuego, una de las más importantes es el impacto humano, ya sea incrementando o disminuyendo la frecuencia de incendios a través del manejo forestal reduciendo el combustible o por cambios en el uso del suelo (Keeley & Syphard, 2016). Los incendios cambian la composición y estructura de los bosques (Omi, 2005). Los incendios afectan la estructura de edades de una población de árboles y el crecimiento de anillos de árboles adultos (Bosch et al., 1992). Para algunas especies el fuego causa un incremento de la regeneración (Knight et al., 1994; Hidalgo, 2003). Rodríguez & Fulé (2003) sostienen que *Pinus hartwegii* presenta adaptaciones al fuego, como la regeneración abundante después del fuego, la capacidad de regenerarse de los rebrotes, la protección de una corteza gruesa y la recuperación de follaje.

En un estudio hecho por Ávila et al. (2014) en el cual se reconstruyó el historial de incendios para el área de estudio del presente trabajo, en el cual se establece que el último incendio de alta intensidad se registro en el año de 1998, no se tienen registros de incendios graves después de esta fecha. En este artículo se pretende contribuir a la comprensión de los efectos del cambio climático y los regímenes de incendios para la conservación de las áreas naturales, tal como lo propone Haire & McGarigal (2008). Los objetivos de este estudio para *Pinus hartwegii* en las altas montañas del noreste de México fueron (1) investigar la relación entre regeneración y cicatrices del fuego en árboles adultos; (2) comparar la regeneración y la evidencia del fuego en las diferentes elevaciones; y, (3) determinar la relación entre regeneración y densidad de árboles adultos.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en el Cerro El Potosí, que se encuentra en la región noreste de México en el estado de Nuevo León (INEGI, 1986). Forma parte de Sierra Madre Oriental, en la subregión fisiográfica de la Gran Sierra Plegada, es la montaña más alta del noreste de México (de 1800 m sobre el nivel del mar (snm) a los 3600 m snm) (INEGI, 1986). Los climas presentes en el área de estudio son semifrío subhúmedo y templado subhúmedo (García *et al.*, 1998;). Cuenta con bosques templados de conífera, mixtos y de encinos, matorrales de encinos y vegetación subalpina y pradera alpina en la parte más alta del cerro (García *et al.*, 1998). En el área se encuentran comunidades de *Pinus culminicola*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus hartwegii*, *Populus tremuloides*, *Abies vejarii* y *Pseudotsuga menziesii* (Aguirre *et al.*, 2003). La distribución de *Pinus hartwegii* se registra desde los 2,800 a los 3,600 msnm, aunque difiere según la exposición y esta es más estrecha en la cara este (Aguirre *et al.*, 2003). En el centro de México la especie alcanza hasta los 4,000 msnm (Beaman y Andersen 1966; Farjon *et al.*, 1997).

Muestreo

El muestreo se llevó a cabo de mediados de 2014 a mediados de 2015. Para determinar el número de árboles con evidencia de incendio, se tomaron 5 elevaciones a lo largo de la distribución de la especie. Solo bosques > 400m de extensión y una pendiente < 45° fueron considerados en el lado este del Cerro El Potosí. Solo tres de estas elevaciones cumplieron con los criterios anteriormente mencionados (3500, 3225 y 3400 m snm). En estas elevaciones todos los individuos con un diámetro altura de pecho DAP > 7.5 cm fueron registrados usando el método de punto cuadrante (Cottam and Curtis, 1956) el cual es más eficiente que el método tradicional de parcelas (Cottam & Curtis, 1956; Martínez & González, 2006). Este método consiste en una serie de puntos a lo largo de un transecto en los cuales cada punto es el centro de cuadrantes imaginarios,

siguiendo los puntos cardinales (norte-sur y este-oeste) se trazan dos líneas imaginarias que se cruzan en el punto, en cada uno de los cuadrantes resultantes se mide la distancia del punto central hacia el árbol más cercano, para obtener un total de 4 árboles por cada punto cuadrante (Cottam y Curtis, 1956; Mitchell, 2010). Para cada una de las tres elevaciones se hicieron 5 sitios y en cada uno de estos sitios, 10 puntos cuadrantes. Un total de 200 árboles para cada elevación (600 en total) fueron muestreados, a los cuales se les tomó la distancia al punto central y la existencia de cicatrices en los troncos de los mismos, además de determinar la densidad de los individuos adultos.

La regeneración se midió con dos cuadrantes de 75 m² por cada sitio obteniendo un total de 10 por elevación. Dentro de cada cuadrante se midieron todos los individuos de la especie por regeneración natural desde recién germinados hasta aquellos con un DN de 7.5 cm, a cada uno de los individuos se les mide el número de verticilos para la determinación de una edad aproximada.

Análisis

Las variables respuesta en este trabajo fueron los árboles con marca de incendio y la regeneración de la especie expresados en número absoluto y densidad, se realizaron pruebas de correlación para determinar si existe relación entre el número de árboles incendiados y la regeneración. Además se hicieron ANOVAS para determinar si existen diferencias entre el número de árboles incendiados y la elevación y entre la regeneración y la elevación. Los datos obtenidos fueron analizados con el software R versión 2.15.0, se hicieron pruebas de normalidad con Shapiro-Wilk para todos los datos, y se realizaron las pruebas de correlación de Pearson y los ANOVAS según el caso.

RESULTADOS

El número de árboles con cicatrices fue similar a lo largo de la elevación ($P= 0.051$). Podría ser que la intensidad del fuego en los años recientes ha sido similar para las tres elevaciones. Hubo una media de 10 a 15 (25 y 37 %) de individuos con cicatriz por muestreo (Fig. 1). El número de árboles con cicatriz a

los 3225 msnm mostraron un error estándar mucho mayor que las elevaciones superiores e inferiores, lo que indica la gran variabilidad en esa elevación (Fig. 1).

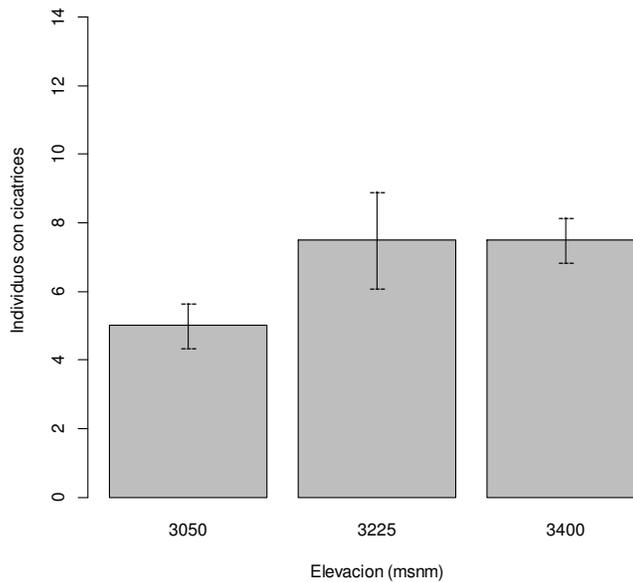


Fig. 1. Número de individuos con cicatrices (Medias \pm es) en las tres elevaciones muestreadas en el lado este del Cerro El Potosí ($F= 0.83$; d. f.= 13; $p= 0.37$).

La regeneración varía con la elevación, con más individuos (3000 ind/ha) en la elevación inferior (3050 msnm), que en elevaciones superiores (533 y 667 ind/ha, Fig. 2). La densidad de individuos adultos difiere con la elevación ($P = 0.002$) (Fig. 3). La densidad en la elevación 3050 es mayor que la densidad en la elevación 3400 m ($P= 0.001$), mientras que la elevación central no difiere con la elevación superior e inferior.

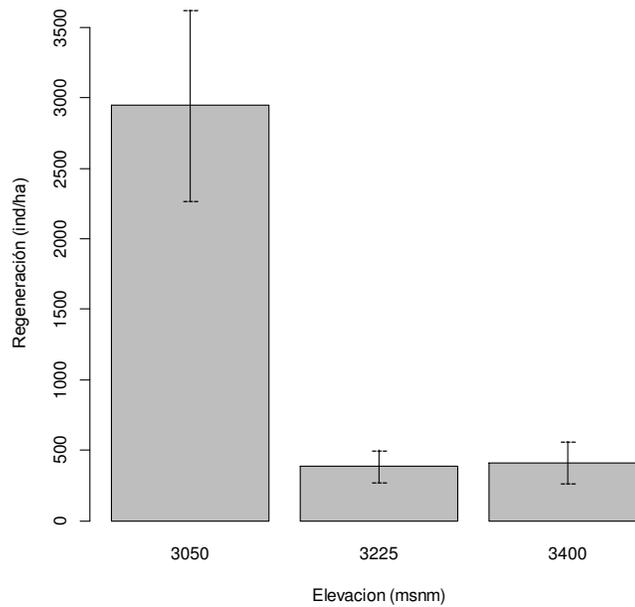


Fig.2 Densidad de individuos jóvenes (DN < 7.5 cm) en tres categorías de elevaciones. (Medias \pm es) (Kruskal-wallis, chi-squared= 14.82, d. f. = 2, $P < 0.001$).

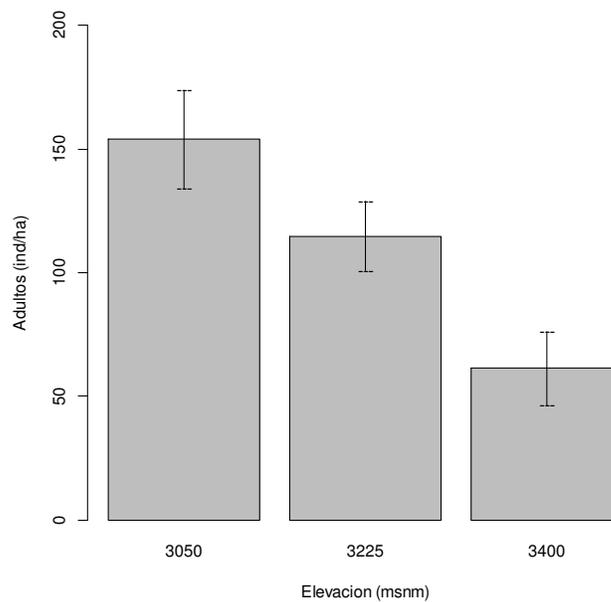


Fig. 3 Densidades de individuos adultos (DN > 7.5 cm) en las tres elevaciones ($F = 7.55$; d. f.=27; $p = 0.002$).

No se encontró correlación entre la regeneración y el número de árboles con cicatriz ($r^2 = 0.32$, $P > 0.05$). Eso es evidencia de que fuegos moderados (Aquellos que pueden ser detectados en árboles vivos dañados, es decir fuegos que no matan los árboles) no promueven o inhiben la regeneración. La comparación entre la densidad de individuos adultos y la regeneración, muestra correlación, en la cual, con una mayor densidad de individuos adultos se encontró una mayor regeneración (Fig. 4), pero con una alta dispersión de los datos ($r^2 = 0.43$, $P = 0.017$). Se encontró una mayor cantidad de individuos jóvenes a menores elevaciones 3050 msnm entre 0 y 4 años ($P < 0.01$) (Fig. 5) la elevación superior no muestra diferencia entre segmentos.

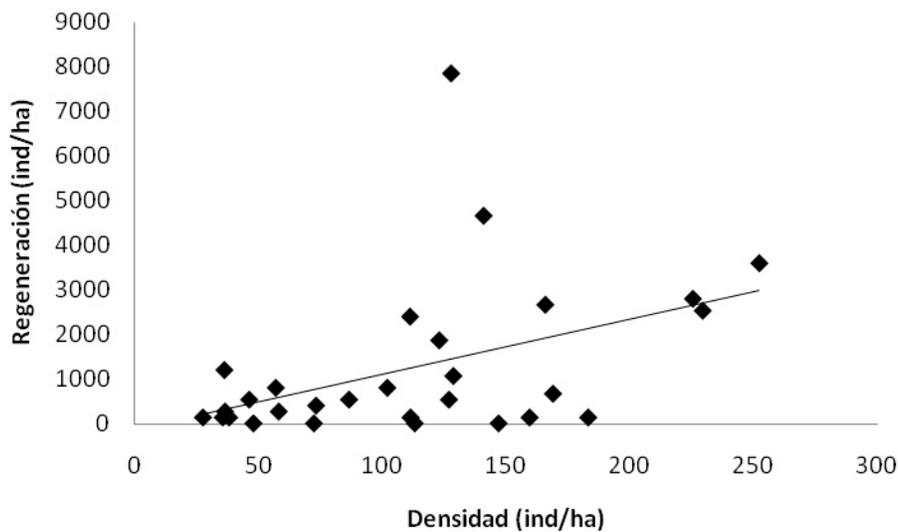


Fig 4 Dispersión de puntos de densidad de individuos adultos y densidad de regeneración ($r^2 = 0.43$; d. f. = 27; $P = 0.017$), la regeneración aumenta al aumentar la densidad de individuos adultos.

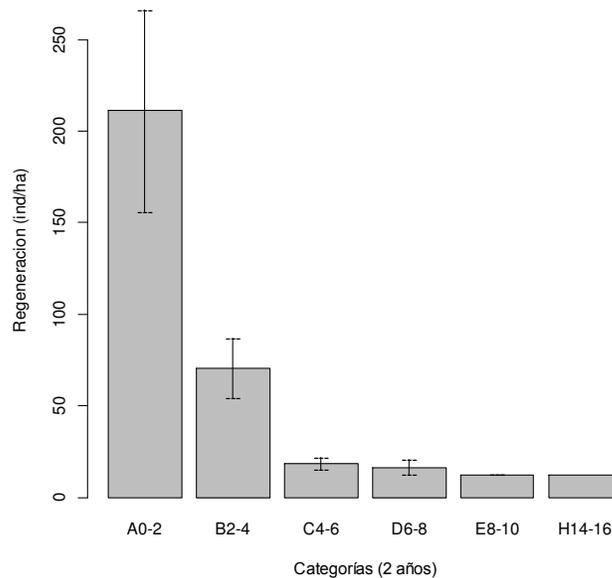


Fig. 5. Comparación de la densidad de regeneración por categoría de edad de la elevación 3050, en la cual se encuentra una marcada diferencia (Kruskal-wallis, chi-squared= 20.1, d. f. = 5, $P < 0.001$). La edad de la regeneración fue dividida en categorías de 2 años, y comparadas entre ellas.

DISCUSIÓN

Post incendio

La regeneración post incendio es sensible a diversos factores y puede proporcionar información crítica para entender la respuesta del bosque fuego, como la composición y estructura del bosque y proyectar la dinámica forestal subsecuente (Bonnet et al., 2005; Han et al., 2015). El fuego leve y moderado en las comunidades de *Pinus hartwegii* favorece la regeneración del mismo (Rodríguez et al., 2001). Esto en contraste con nuestros resultados, ya que no se encontró relación directa entre las evidencias de incendio medio y moderado con la regeneración en nuestro estudio. El tamaño y la intensidad del incendio así como las condiciones climáticas posteriores al mismo tienen efectos en la recuperación de los ecosistemas (Meng et al., 2015). Crotteau J. S. et al (2013),

encontraron que la regeneración de coníferas se ve beneficiada por incendios de baja y mediana intensidad. Lo mismo fue encontrado para la regeneración de *Populus tremuloides* (Wang et al., 2014), *Pinus pinaster* (Vega et al., 2008), *P. sylvestris* (Beghin et al., 2010) and *P. yuananensis* (Tang et al., 2013; Chen et al., 2014), mientras que reduce la regeneración de *P. nigra* (Borja et al., 2016) y *P. pinaster* (Fernandez et al., 2007). Ouzts et al., (2015) encontró que la regeneración natural para *Pinus ponderosa* no aumentó hasta 10 años después de ocurrido un incendio, por lo cual es probable que *P. hartwegii* tenga un comportamiento similar al de *P. ponderosa*, ya que la mayoría de los individuos encontrados tienen entre 0 y 10 años, pero principalmente en el segmento de 0 a 4 años. El último incendio de alta intensidad registrado para el área de estudio fue en 1998 (Ávila et al., 2015). Allen et al., (2010) encuentra que la mortandad de individuos de regeneración post incendio es debida a la disminución de la disponibilidad de agua por el aumento de las temperaturas. Rother et al., (2015) encuentra datos similares para *P. ponderosa*, mientras que Savage (2013) encuentra que la capacidad de *P. ponderosa* para regenerarse cada vez es menor por el aumento del tiempo de las sequías. Resultados similares a los de *P. ponderosa* para *P. lambertiana* y *P. jeffreyi* (Zald et al., 2008).

En aquellas áreas en las cuales no quedan individuos vivos debido a la intensidad del fuego se encuentra que para *Pinus ponderosa* la regeneración es mayor mientras más cerca este de la línea de árboles (Chambers et al., 2016). Christopouloa et al., (2014) encuentran resultados similares para *P. nigra* en el cual mientras esté más cercano a áreas no incendiadas mayor será la regeneración. En las áreas del Cerro El Potosí las cuales quedaron desprovistas de vegetación no se aprecia regeneración de *P. hartwegii* ni de otra especie leñosa. Los suelos quemados severamente interactúan en detrimento del restablecimiento de los pinos (Vacchiano et al., 2014)

Elevación

En el Cerro El Potosí se aprecia una reducción considerable de la extensión de territorio ocupado por *P. hartwegii* ya que solo la región central cuenta con masas forestales considerables mientras que en la elevación superior fue eliminado por completo. De acuerdo a los resultados obtenidos por Gutiérrez y Trejo (2014) *P. hartwegii* perderá alrededor del 80 % de su distribución actual en una proyección hecha para el 2050. La elevación es uno de los factores principales en la regeneración (Chambers et al. 2016). Para *Pinus ponderosa* la regeneración es mayor a mayores elevaciones (Ouzts et al., 2015; Chambers et al., 2016) mientras que para *P. hartwegii* la elevación baja fue la que obtuvo mayor densidad de regeneración en este estudio. Petrie et al., (2016) mencionan, que para *Pinus ponderosa* y *P. contorta* se encontró una mayor regeneración en aquellas áreas que tienen temperaturas medias entre 20 y 25°C, en la distribución más baja de las especies. Contrario a lo que menciona Rother et al (2015) para *P. ponderosa* y *Pseudotsuga menziesii* que la regeneración en las elevaciones inferiores puede inhibirse debido a la sequía y las altas temperaturas provocadas por el calentamiento global. Erickson et al., (2015) encontraron un elevado descenso de las condiciones adecuadas para la regeneración en Alberta Canadá. En proyecciones hechas para los bosques de Japón, se pronostica que los límites de los rangos altitudinales se desplazarán hacia arriba alrededor de 293 metros, lo que provocará extinciones locales de especies alpinas (Ogawa-Onishi et al., 2010). En el caso de este estudio, la regeneración fue mayor a menores elevaciones, por lo tanto un desplazamiento de la especie a mayores elevaciones podría ser difícil debido a la posible disminución del germoplasma causado por los incendios.

Cobertura

Posterior al incendio, se ha encontrado que los bosques mixtos de coníferas son más resistentes al fuego que los bosques puros (Kemp et al., 2016). Meng et al., (2015) encuentra que los bosques mixtos tienden a recuperarse más

rápidamente que los bosques puros de *Abies magnifica*. Calvo en el 2003 menciona que la regeneración de *P. pinaster* tras un incendio es mayor en bosques mixtos dominados por *Quercus* que en bosques puros. En nuestro estudio se encontró que hay mayor densidad (y por tanto mayor cobertura) de individuos adultos en las menores elevaciones. La cobertura abundante juega en favor de la regeneración (Kemp et al., 2016) debido al retardo de la evaporación (Vacchiano et al., 2014). Esto concuerda con los hallazgos en este estudio, ya que se encontró una relación entre la densidad de los individuos adultos y la regeneración, con una mayor regeneración a mayor densidad. Aunque otros autores encuentran una mayor supervivencia después del raleo del bosque (Man et al., 2009).

CONCLUSIONES

No se encontró relación directa entre número de individuos con cicatrices y regeneración de *Pinus hartwegii*. Hubo quizás una o más variables afectando la regeneración en las diferentes elevaciones. El número de árboles con cicatriz fue similar en las tres elevaciones (25% a 37%). Contrario a lo que se esperaba una mayor densidad de individuos jóvenes fue encontrada a menores elevaciones (3050 msnm) que a mayores elevaciones (3225 y 3400 msnm). Una mayor regeneración fue encontrada en los lugares donde la densidad de individuos adultos era mayor.

Capítulo 3

Estructura de población y densidad de *Pinus hartwegii* en un gradiente de elevación

RESUMEN

El conocimiento de la estructura y densidad de los bosques es de vital importancia para el manejo de los mismos. Existen factores que modifican estas estructuras, dentro de los principales se encuentra la regeneración, que a su vez se ve afectada por las condiciones ambientales que prevalecen en el área. Otro factor relevante es el fuego, el cual difiere en su impacto dependiendo de su frecuencia e intensidad. En este estudio se realizaron comparaciones de las estructuras de edades en un gradiente de elevación de un bosque de *Pinus hartwegii* en el Cerro El Potosí, en el Noreste de México. Se determinaron las edades de los árboles por medio de muestras de núcleos de los árboles seleccionados (100 por elevación), además de la estimación de edad de los individuos jóvenes que representan la regeneración, por medio del conteo de los verticilos de sus ramas. Comparamos las categorías de 20 años generados para cada una de las tres elevaciones seleccionadas. Para todos los casos los individuos <20 años fueron los de mayor densidad. Excluyendo la regeneración, los individuos jóvenes entre 20 y 40 años de la elevación media fueron los de mayor densidad mientras que en la elevación superior fueron los de menor densidad en general. Este comportamiento puede ser debido al incendio ocurrido en 1998, ya que los individuos jóvenes de entonces eran más susceptibles al fuego.

ABSTRACT

Knowledge of the structure and density of forests is of vital importance for the management of forests. There are factors that modify these structures, within the main is the regeneration, Which in turn is affected by the environmental conditions prevailing in the area. Another relevant factor is fire, which differs in its impact depending on its frequency and intensity. In this study, we compared the age structures in an elevation gradient of a *Pinus hartwegii* forest in Cerro El Potosí, in the Northeast of Mexico. The ages of the trees were determined by means of samples of nuclei of the selected trees (100 per elevation), In addition to estimating the age of young individuals representing regeneration, by means of the counting of the whorls of its branches. We compare the categories of 20 years generated for each of the three selected elevations. For all cases the individuals <20 years were the ones with the highest density. Excluding regeneration, the young individuals between 20 and 40 years of the average elevation were the ones with the highest density while in the upper elevation were the ones with the lowest density in general. This behavior may be due to the fire that occurred in 1998, since the young individuals of that time were more susceptible to fire.

INTRODUCCIÓN

La frecuencia e intensidad de los fenómenos naturales queda registrada en la estructura del bosque y los anillos de crecimiento, estos eventos pueden ser: inundaciones, tormentas, erupciones volcánicas, deslizamientos, caídas de rocas, flujos de escombros, avalanchas de nieve e incendios moderados (Bosch et al., 1992; Omi, 2005; Stoffel, 2010; Brown et al., 2011; Williams et al., 2013). Las condiciones ambientales locales son las causantes de los patrones de estructura, densidad y composición del bosque (Holeksa et al., 2007; Dang et al., 2013), principalmente por su influencia en la regeneración (Holeksa et al., 2007). La regeneración, además depende de otros factores como disponibilidad de agua, luz, temperatura y depredadores de semillas (Rooney et al., 2002; Benechet et al., 2004; Bonnet et al., 2005; Fenner & Thompson, 2005). La migración de las condiciones ambientales hacia mayores elevaciones y latitudes hace pensar que se encontrarán más individuos jóvenes a mayores elevaciones (Root et al., 2003; Parmesan y Yohe, 2003). Peñuelas et al., (2007) encontró un desplazamiento de *Fagus sylvatica* tanto por el aumento de las temperaturas como por restricciones de quemadas controladas. La temperatura es una variable de gran influencia para la regeneración (Chamber et al., 2016).

Los efectos del ambiente sobre la estructura de la población y la dinámica de regeneración de los bosques podría mejorarse si se realizan estudios locales en los que se analicen los gradientes altitudinales y las diferentes condiciones ambientales (Dang et al. 2010; Dang et al., 2013; Peñuelas et al., 2007; Wang et al., 2004). Proveer información sobre densidades y estructuras son altamente relevantes para el manejo restauración y conservación de los bosques (Hagmann et al., 2014). Es necesario comprender mejor la relación entre el aumento de las temperaturas y el efecto que estas pueden provocar en la regeneración (Smith et al., 2009).

Los incendios moderados modifican la estructura del bosque matando algunos árboles y promoviendo el establecimiento de otros (Omi, 2005; Bekker y Taylor, 2010; Sawada et al., 2016). La falta de incendios también provoca cambios

en bosques adaptados al fuego (Beaty et al., 2007). La frecuencia de incendios ha aumentado en las últimas décadas (Williams et al 2013). Se ha planteado una relación entre el aumento de las temperaturas y el aumento de las frecuencias de los incendios, aunque se argumenta que no hay evidencias suficientes para asegurar el aumento de los incendios en la mayoría de los bosques (Doerr et al. 2016).

Dada la importancia del conocimiento de la composición y estructura de edades de los bosques, los objetivos de este estudio fueron (1) Determinar si existen diferencias entre la densidad de individuos de *Pinus hartwegii* entre las edades (en categorías de 20 años) en cada uno de las elevaciones; (2) Comparar las edades entre las elevaciones; (3) investigar si existe diferencia entre la densidad de todas las edades de la especie y las elevaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio fue realizado en un bosque natural en el Cerro El Potosí, que se encuentra en la región noreste de México en el estado de Nuevo León (INEGI, 1986). Forma parte de Sierra Madre Oriental, en la subregión fisiográfica de la Gran Sierra Plegada, se caracteriza por ser el más alto del Noreste (INEGI, 1986). Los climas presentes en el área de estudio son semifrío subhúmedo, templado subhúmedo (García *et al.*, 1998). Los bosques predominantes son los templados de coníferas, mixtos y de encinos, contando también con matorrales de encinos y vegetación subalpina y pradera alpina en la parte más alta del cerro (García *et al.*, 1998). En el área las comunidades de *Pinus culminicola*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus hartwegii*, *Populus tremuloides*, *Abies vejarii* y *Pseudotsuga menziesii* son las predominantes (Aguirre *et al.*, 2003). *Pinus hartwegii* cuenta con una distribución restringida, la cual se registra desde los 2,800 a los 3,600 msnm, aunque difiere según la exposición y esta es más estrecha en la cara Este (Aguirre *et al.*, 2003). En otras regiones la especie puede ser encontrada hasta los 4,000 msnm (Beaman y Andersen 1966; Farjon *et al.*, 1997). Ávila et al. (2014) encontraron en

un estudio de reconstrucción de historial del fuego, que el último incendio fuerte registrado en el área de estudio ocurrió en el año de 1998.

Muestreo

El muestreo fue realizado de Abril del 2014 a Mayo de 2015. Para determinar la densidad de árboles de *Pinus hartwegii* (>7.5 cm a diámetro a la altura del pecho DAP) se tomaron 5 elevaciones a lo largo de la distribución altitudinal de la especie, solo para rodales con un diámetro mayor a 400 m y en una pendiente menor a 45°, para la exposición Este del Cerro El Potosí. Tres de estas elevaciones cumplieron con los criterios mencionados (3050, 3225 y 3400 msnm), en la elevación 2875 msnm los rodales fueron muy pequeños y en la elevación 3575 msnm no se encontraron individuos de la especie. En esta última área hay evidencia de un incendio severo que acabó con las poblaciones de *P. hartwegii* y *P. culminicola* que Aguirre et al., (2003) menciona para esta área. En estas elevaciones se hicieron muestreos de los individuos mayores a 7.5 cm DAP por medio del método del punto cuadrante (Cottam y Curtis, 1956) que ha mostrado ser más eficiente que el método tradicional de cuadrantes (Cottam y Curtis, 1956; Martínez y González, 2006). Este método consiste en poner una serie de puntos a lo largo de transectos en los cuales cada punto es el centro de cuadrantes imaginarios. Siguiendo los puntos cardinales (norte-sur y este-oeste) se trazan dos líneas imaginarias que se cruzan en el centro, en cada uno de los cuadrantes resultantes se mide la distancia del centro hacia el árbol más cercano, para obtener un total de 4 árboles por cada punto cuadrante (Cottam y Curtis, 1956; Mitchell, 2010). Para las tres elevaciones se hicieron 5 transectos y en cada uno de éstos, 10 puntos cuadrantes. Por lo anterior se midió un total de 200 árboles por elevación (600 en total), a los cuales les fue tomada la distancia al punto central. Se midió DAP y altura de los individuos.

Se tomaron muestras de núcleos por medio del taladro de pressler para la determinación de la edad de los individuos, se seleccionaron 20 núcleos por transecto generando un total de 100 núcleos por elevación (un núcleo por árbol). Todos fueron secados, montados, lijados y analizados por daños o fragmentos perdidos, la secuencia de anillos fue datada visualmente utilizando el patrón de crecimiento de anillos (crecimiento temprano y crecimiento tardío).



Fig. 1 muestras de núcleos tomadas con el taladro de pressler a la altura de pecho, en las cuales se puede observar claramente el crecimiento temprano y el crecimiento tardío de los anillos, y la diferencia en la cantidad de los mismos.

La regeneración se midió con dos cuadrantes de 75 m² por cada transecto, obteniendo un total de 10 por elevación. Dentro de cada cuadrante se midieron todos los individuos de la especie desde recién germinados hasta aquellos con un DAP de 7.5 cm. A cada uno de los individuos se le midió el número de verticilos de ramas para la inferir su edad (un verticilo por año).

Análisis

Las variables respuesta en este trabajo fueron la densidad de árboles y la densidad de las categorías de edades en ind/ha, además de las edades de los individuos expresadas en años y el DAP expresado en cm. Los datos obtenidos fueron analizados con el software R versión 2.15.0, se hicieron pruebas de normalidad con Kolmogorov-Smirnov para todos los datos, se realizaron ANOVAS y pruebas de Kruskal-Wallis según cumplieran o no con el principio de normalidad.

RESULTADOS

No se encontraron diferencias entre las categorías de edad para la elevación 3,050 m snm, contando con medias de densidad entre los 10 y 30 ind/ha (chisq = 11.03, d. f. = 7, P= 0.13). Los individuos jóvenes (0 a 20 años) fueron diferentes del resto de categoría de edades, al tener las mayores densidades 2500

ind/ha. Los individuos más longevos (140 a 180 años) con densidades de 6 ind/ha difieren de las categorías de menor edad (chisq =20.35, d. f. =8, P = 0.009) (Fig. 2).

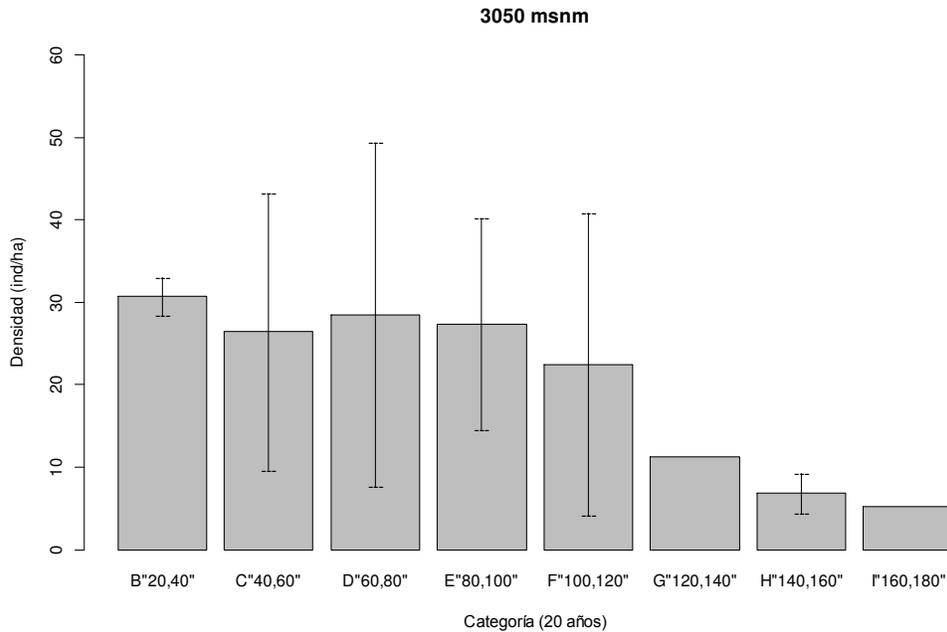


Fig. 2. Densidad de categorías de edad (20 años) (media \pm se) para la elevación 3050 msnm (F = 1.12, d. f. = 20, P = 0.38). En la cual no se encuentran diferencias entre las categorías.

Las densidades fueron mayores para la categoría 20 a 40 años con media de 40 ind/ha comparado con el resto de las categorías para la elevación 3,225 m (F =4.78, d. f. = 6, P = 0.003). Los individuos de regeneración (0 a 20 años) con las mayores densidades fueron diferentes de las categorías de edades superiores a 40 años, estos últimos con medias de densidades de 10 ind/ha (chisq= 18.5, d. f. = 7, P = 0.009) (Fig. 3).

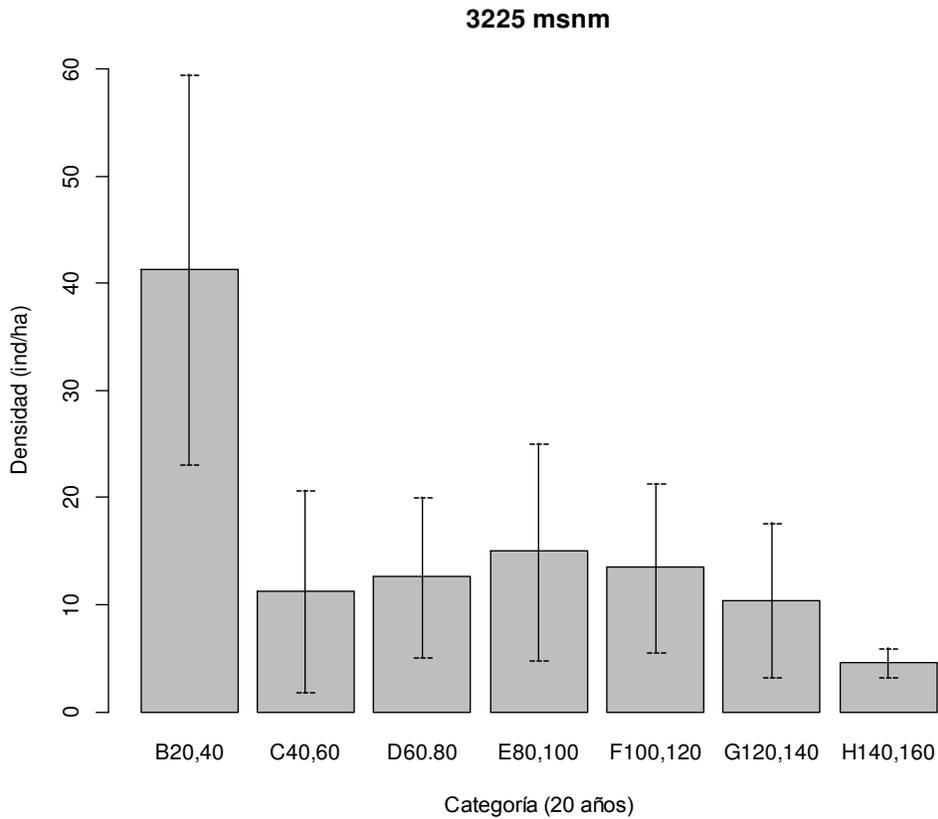


Fig. 3. Densidad de categorías de edad (20 años) (media \pm se) para la elevación 3225 msnm ($F = 4.78$, d. f. = 20, $P = 0.003$). La categoría de 20 a 40 años muestra mayores densidades

Se encontró una menor densidad para la categoría 20 a 40 años en la elevación 3,400 m, con densidad de 3.3 ind/h, mientras que las categorías 40 a 60 y 80 a 100 años contaron con las mayores densidades ($\text{chisq} = 8.63$, d. f. = 8, $P = 0.03$). Se encontró una mayor densidad de individuos jóvenes (0 a 20 años) que del resto de categorías excepto la de 40 a 60 años ($\text{chisq} = 18.8$, d. f. = 9, $\text{Chisq} = 0.026$) (Fig. 4).

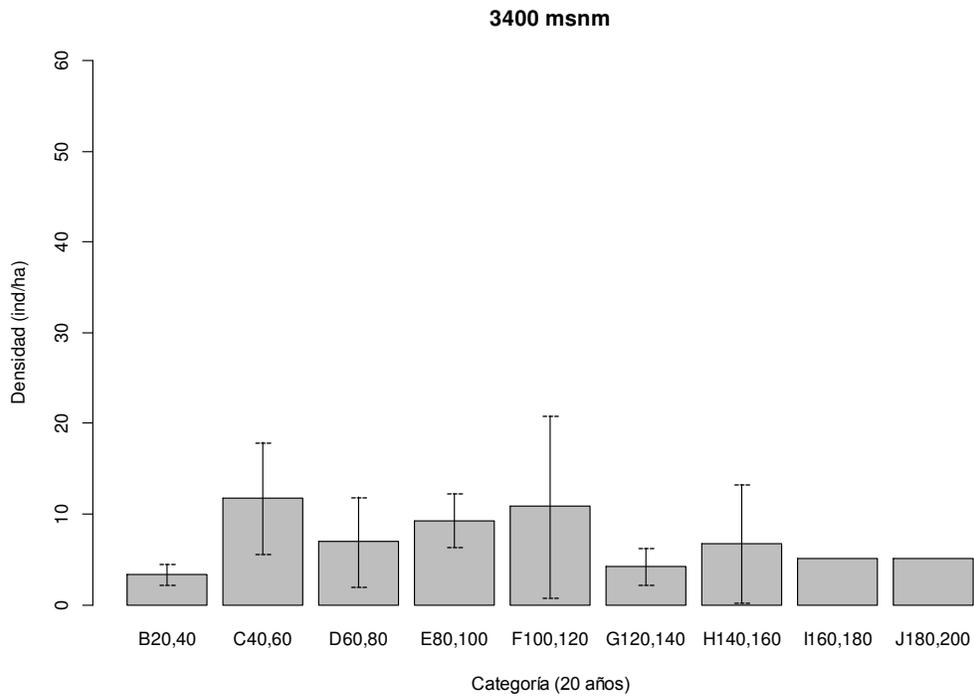


Fig. 4. Densidad de las categorías de edad (media \pm se) para la elevación 3400 msnm ($F=0.84$, d. f. =20, $P = 0.58$)

Se encontró mayor densidad de la categoría de edad de 20 a 40 de 3,225 m (40 ind/ha) con el resto de categorías. Las densidades de esa misma categoría difiere con categorías de la elevación 3,400 m con densidades promedio de 5 ind/ha excepto para las categorías 40 a 60 y 100 a 120 años ($F= 3.32$, d. f.= 20, $p= 0.001$) (Fig. 5).

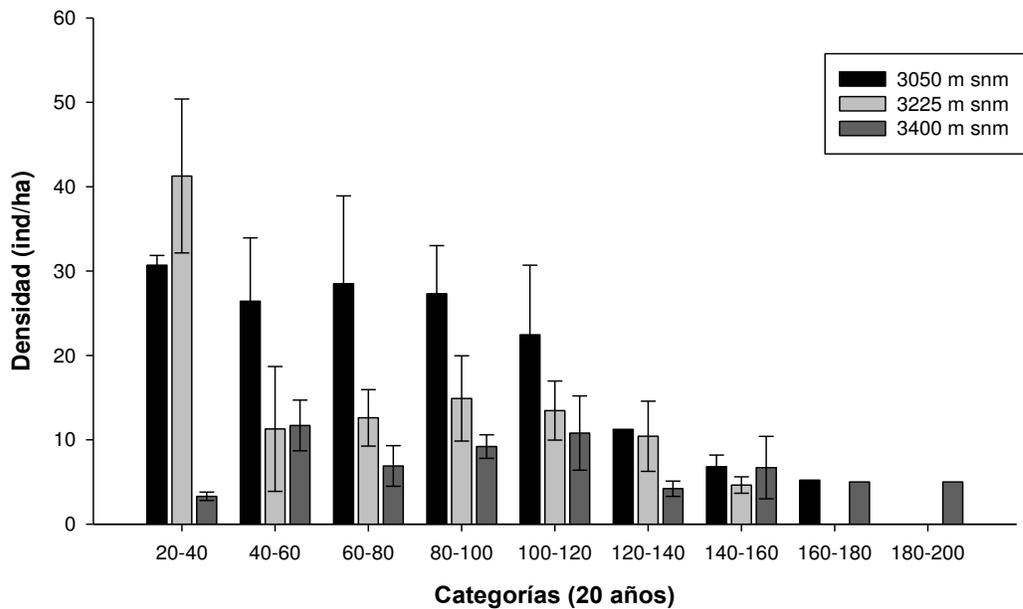


Fig. 5. Densidades de las categorías de edades (20 años) (media \pm se) en las tres elevaciones. En las cuales se aprecian mayores densidades a menores edades. Los individuos jóvenes de 20 a 40 años son los que presentan la diferencia más marcada entre las elevaciones.

Para las tres elevaciones se encontró que a mayor edad, la altura y el DAP son mayores, sin embargo la elevación media presenta mayores valores de r^2 para ambas variables (Altura $r^2 = 0.75$, DAP $r^2 = 0.8$). Se encuentra mayor correlación entre el DAP r^2 entre 0.67 y 0.8 que en la altura r^2 entre 0.46 y 0.75. En todas las correlaciones se obtuvieron valores de $P < 0.001$ (Fig. 6 y Fig. 7).

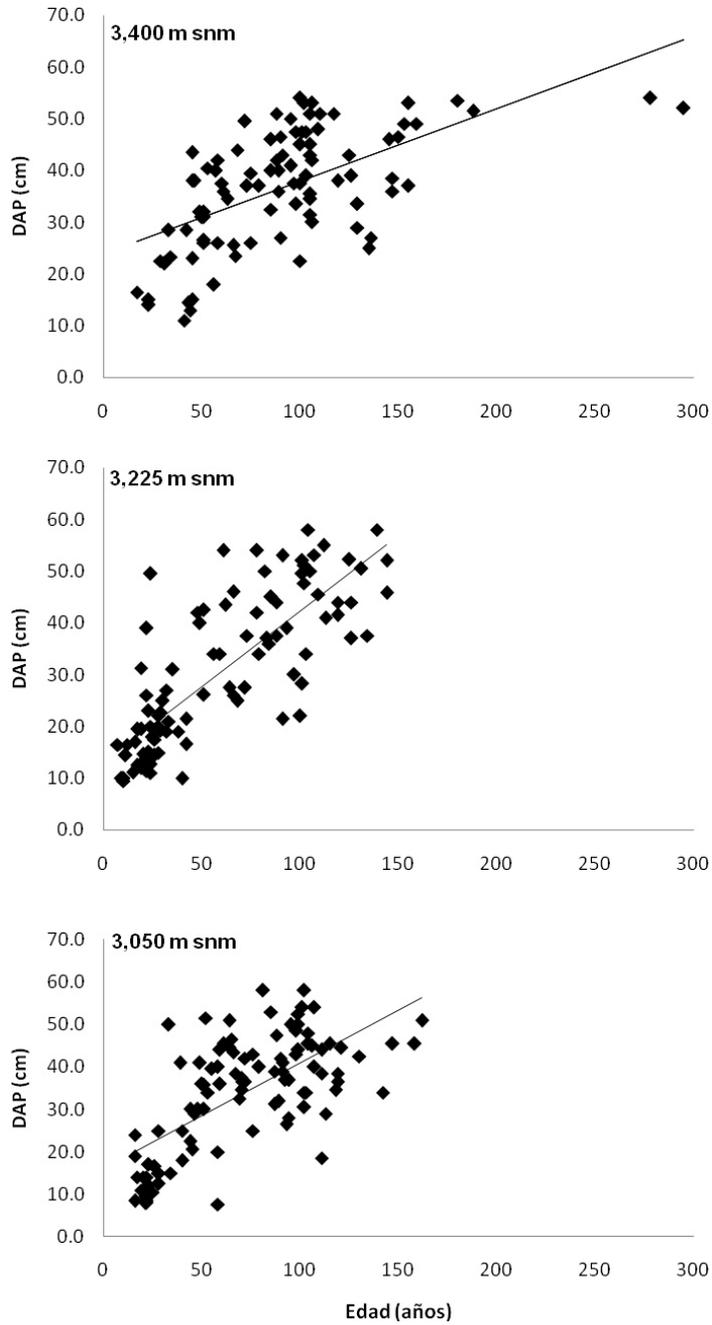


Fig. 6. Correlaciones de edad entre DAP de *Pinus hartwegii* en tres elevaciones en el Cerro El Potosí. En las cuales se aprecia mayor crecimiento para la elevación central.

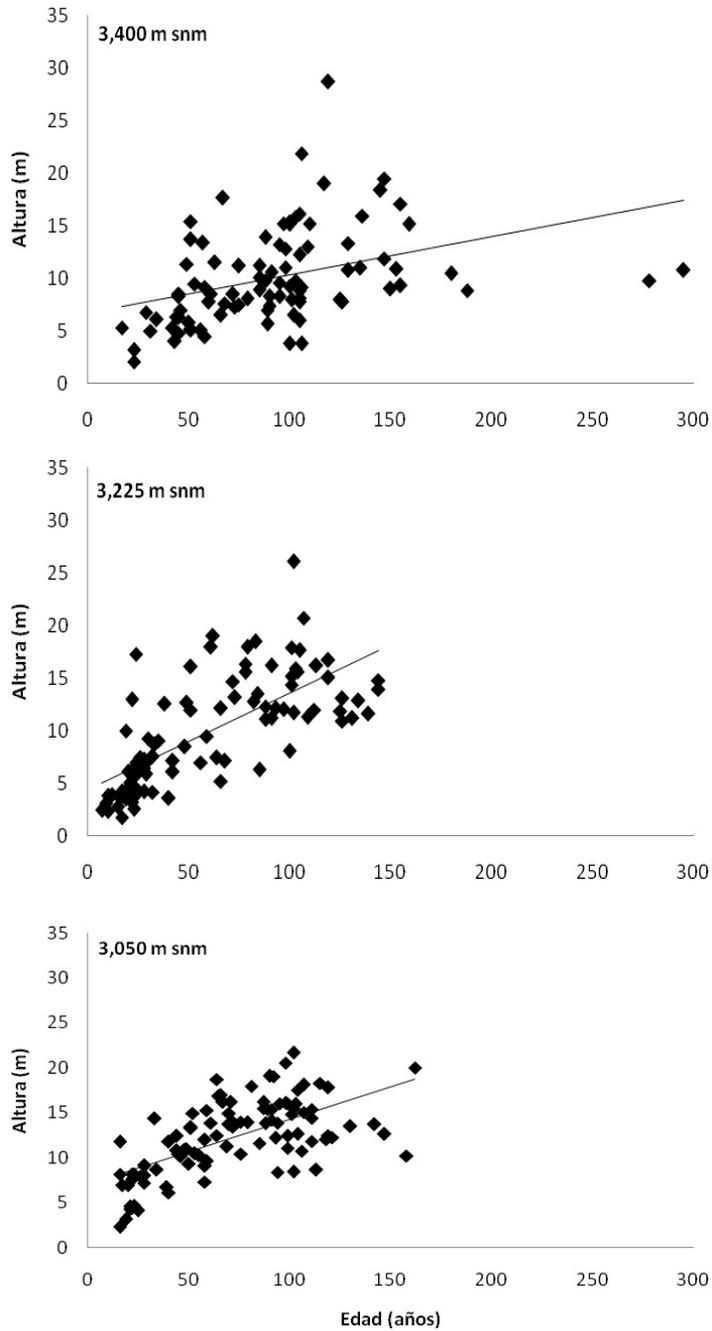


Fig. 7. Correlaciones de edad entre Altura de *Pinus hartwegii* en tres elevaciones en el Cerro El Potosí. Al igual que el DAP la elevación central presenta un mayor crecimiento en altura.

DISCUSIÓN

Las densidades encontradas para este estudio a lo largo de la distribución altitudinal de la especie fueron menores a mayores elevaciones. Mientras que encontraron para *Abies fargesii* que las densidades son mayores a mayores elevaciones al igual que encontraron mayor densidad de individuos jóvenes a mayores elevaciones (Dang et al., 2010). Para *Pinus ponderosa* Hagmann et al., (2013) encontraron que la supresión de incendios genera un aumento considerable de la densidad.

Wang et al. (2004) encontraron un mayor número de individuos jóvenes en menores elevaciones para *Picea schrenkiana* coincidiendo con los resultados obtenidos para este trabajo. Para *Abies fargesii*, Dang et al. (2010; 2013) hubo un mayor reclutamiento de individuos a mayores alturas durante el siglo pasado, quedando marcado este en la estructura de edades de dicha elevación, contrario a lo encontrado en este estudio para *Pinus hartwegii*.

La distribución en forma de j invertida encontrada para la densidad por edad de *Abies spectabilis* es característica de áreas sin disturbio, aunque el porcentaje de individuos jóvenes es alto también lo es la mortalidad de los mismos (Chhetri et al., 2016). Al igual que para *A. spectabilis* las poblaciones de *Abies georgei* experimentan una severa selección natural en los primeros años de vida (Ren et al., 2007). *Pinus hartwegii* también muestra una distribución de j invertida con densidades mayores para categorías más jóvenes.

La relación entre la edad y Altura o DAP pueden dar un acercamiento hacia el comportamiento del crecimiento en diferentes zonas. En contraste con lo encontrado para *Abies fargesii* (Dang et al., 2013), las correlaciones de nuestro estudio entre edad y DN así como altura fueron altas.

Wang et al. (2004) encontraron que las temperaturas y las precipitaciones son factores que juegan un importante rol en la estructura de edades para *Picea schrenkiana* en los límites superiores e inferiores. Holeksa et al., (2007) al igual

que St-Denis et al., (2010) encontraron que los patrones de regeneración de *Picea abies* y *P. mariana* no son continuos a grandes escalas, lo cual pudiera ser el fenómeno que se está presentando con los individuos de *Pinus hartwegii* ya que se presenta mayor cantidad de individuos en las elevaciones inferiores con edades <20 años, mientras que en la elevaciones medias la categoría de 20 a 40 años es la que presenta mayores densidades comparado con las categorías de años subsecuentes. Puede ser que este fenómeno sea una característica importante para estos bosques al igual que lo es para *Picea abies*. De acuerdo a lo que menciona Dang et al., (2013) el alto número de individuos jóvenes en la elevación inferior mostrados para *Pinus hartwegii* podría causar el cambio de la estructura del bosque en esa área.

Bekker y Taylor (2010), mencionan que los incendios moderados modifican la estructura del bosque matando algunos árboles y promoviendo el establecimiento de otros, lo cual coincide en parte con lo ocurrido en este estudio ya que es probable que la mayor regeneración encontrada en la elevación inferior sea por esa causa. También es probable que la baja densidad de la categoría de edades de entre 20-40 años de la elevación superior se deba al incendio ocurrido en 1989, ya que en ese tiempo estos individuos eran juveniles y por lo tanto más susceptibles al fuego.

CONCLUSIONES

Se encontró una mayor densidad de individuos <20 años a menores elevaciones. Hubo mayores densidades de individuos jóvenes >20 años comparado con individuos de mayores edades para la elevación media (3225 msnm), mientras que la elevación superior (3400msnm) registro las menores densidades de individuos jóvenes, esta última presentó las menores densidades. Se encontró una alta correlación entre la edad y DAP en la cual a mayor edad mayor DAP, mientras que la relación entre edad y altura es menor.

LITERATURA CITADA

- Aguirre, O. A., J. Jiménez, H. Kramer, A. Akca. 2003. Análisis estructural de ecosistemas forestales en el Cerro del Potosí, Nuevo León, México. *Ciencia UANL*. 6(2), 219-225.
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), 95-111.
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., González, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A. & Cobb, N. (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684.
- Ávila Flores, Diana Yemilet, González Tagle, Marco Aurelio, Jiménez Pérez, Javier, Aguirre Calderón, Oscar Alberto, Treviño Garza, Eduardo Javier, & Vargas Larreta, Benedicto. (2014). Dendrochronopyrology: analysis of the morphological evidence of forest fires. *Revistamexicana de cienciasforestales*, 5(21), 136-147.
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (1998). *Seeds: ecology, biogeography, and, evolution of dormancy and germination*. Elsevier.
- Beaman, J. H. y J. W. Andresen. 1966. The vegetation, floristics and phytogeography of the summit of Cerro Potosi, Mexico. *American Midland Naturalist* 75(1), 1-33.
- Beaty, R. M., and A. H. Taylor. 2007. Fire disturbance and forest structure in old-growth mixed conifer forests in the northern Sierra Nevada, Lake Tahoe Basin, California, USA. *Journal of Vegetation Science* 18:879–890.

- Beghin, R., Lingua, E., Garbarino, M., Lonati, M., Bovio, G., Motta, R., & Marzano, R. (2010). *Pinus sylvestris* forest regeneration under different post-fire restoration practices in the northwestern Italian Alps. *Ecological Engineering*, 36(10), 1365-1372.
- Bekker M. F., Taylor A. H. 2010. Fire disturbance, forest structure, and stand dynamics in montane forests of the southern Cascades, Thousand Lakes Wilderness, California, USA. *Écoscience* 17 (1):59-72.
- Benech-Arnold, R. L., & Sanchez, R. A. (2004). *Handbook of seed physiology: applications to agriculture*. Food Products Press.
- Bonnet, V. H., Schoettle, A. W., & Shepperd, W. D. (2005). Postfire environmental conditions influence the spatial pattern of regeneration for *Pinus ponderosa*. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(1), 37-47.
- Brown, C. D., & Johnstone, J. F. (2012). Once burned, twice shy: Repeat fires reduce seed availability and alter substrate constraints on *Picea mariana* regeneration. *Forest Ecology and Management*, 266, 34-41.
- Bonnet, V. H., Schoettle, A. W., & Shepperd, W. D. (2005). Postfire environmental conditions influence the spatial pattern of regeneration for *Pinus ponderosa*. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(1), 37-47.
- Bosch, O., Giné, L., Ramadori, E. D., Bernat, A., & Gutiérrez, E. 1992. Disturbance, age and size structure in stands of *Pinus uncinata* Ram. *Pirineos*, 140, 5-14.
- Calvo, L., Santalla, S., Marcos, E., Valbuena, L., Tárrega, R., & Luis, E. (2003). Regeneration after wildfire in communities dominated by *Pinus pinaster*, an obligate seeder, and in others dominated by *Quercus pyrenaica*, a typical resprouter. *Forest Ecology and Management*, 184(1), 209-223.
- 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.
- Chen, W., Moriya, K., Sakai, T., Koyama, L., & Cao, C. (2014). Post-fire forest regeneration under different restoration treatments in the Greater Hinggan Mountain area of China. *Ecological Engineering*, 70, 304-311.
- Chhetri, P. K., Bista, R., & Cairns, D. M. (2016). Population structure and dynamics of *Abies spectabilis* at treeline ecotone of Barun Valley, Makalu Barun National Park, Nepal. *Acta Ecologica Sinica*, 36(4), 269-274.
- 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.
- Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37(3), 451-460.
- Crotteau, J. S., Varner, J. M., & Ritchie, M. W. (2013). Post-fire regeneration across a fire severity gradient in the southern Cascades. *Forest Ecology and Management*, 287, 103-112.
- Dang, H., Zhang, Y., Zhang, K., Jiang, M., & Zhang, Q. (2010). Age structure and regeneration of subalpine fir (*Abies fargesii*) forests across an altitudinal range in the Qinling Mountains, China. *Forest Ecology and Management*, 259(3), 547-554.
- Dang, H., Zhang, K., Zhang, Y., Tong, X., & Zhang, Q. (2013). Regeneration dynamics of subalpine fir (*Abies fargesii*) forest across the altitudinal range in the Shennongjia Mountains, central China. *Journal of Plant Ecology*, 6(1), 36-47.

- Doerr, S. H., & Santín, C. (2016). Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 371(1696), 20150345.
- 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.
- Fernández, C., Vega, J. A., Fonturbel, T., Jiménez, E., & Pérez-Gorostiaga, P. (2008). Effects of wildfire, salvage logging and slash manipulation on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in Orense (NW Spain). *Forest Ecology and Management*, 255(3), 1294-1304.
- Farjon, A., J. A. Pérez de la Rosa y B. T. Styles, (1997). Guía de campo de los pinos de México y América Central. *Royal Botanical Gardens*. UK. 151 pp.
- Fenner, M., & Thompson, K. (2005). *The ecology of seeds*. Cambridge University Press.
- Fritts, H. C. (1965). Tree-ring evidence for climatic changes in western North America.
- García A, M.A., E.J., Treviño G., C.M. Cantú A., and F.N. González S. 1999. Zonificación ecológica del Cerro "El Potosí", Galeana; Nuevo León, México. *Investigaciones Geográficas* 38:31-40.
- Génova, M. y D. Martínez. 2016. La dendrocronología como fuente de información de la dinámica forestal de *Pinus nigra* en Checa (Guadalajara). Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.
- Guitérrez, 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.

- Hagmann, R. K., Franklin, J. F., & Johnson, K. N. (2013). Historical structure and composition of ponderosa pine and mixed-conifer forests in south-central Oregon. *Forest Ecology and Management*, 304, 492-504.
- Hagmann, R. K., Franklin, J. F., & Johnson, K. N. (2014). Historical conditions in mixed-conifer forests on the eastern slopes of the northern Oregon Cascade Range, USA. *Forest Ecology and Management*, 330, 158-170.
- Haire, S. L., & McGarigal, K. (2008). Inhabitants of landscape scars: succession of woody plants after large, severe forest fires in Arizona and New Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 53(2), 146-161.
- 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.
- Harper, J. L., 1978. Population biology of plants. London: *Academic press*.
- Hidalgo, J. V. (2003). Regeneración del género *Pinus* tras incendios. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (15).
- Holeksa, J., Saniga, M., Szwagrzyk, J., Dziedzic, T., Ferenc, S., & Wodka, M. (2007). Altitudinal variability of stand structure and regeneration in the subalpine spruce forests of the Pol'ana biosphere reserve, Central Slovakia. *European Journal of Forest Research*, 126(2), 303-313.
- 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.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1986). Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. México.

- Kayes, L. J., Anderson, P. D., & Puettmann, K. J. (2010). Vegetation succession among and within structural layers following wildfire in managed forests. *Journal of Vegetation Science*, 21(2), 233-247.
- Keeley, J. E., & Syphard, A. D. (2016). Climate Change and Future Fire Regimes: Examples from California. *Geosciences*, 6(3), 37.
- Kemp, K. B., Higuera, P. E., & Morgan, P. (2016). Fire legacies impact conifer regeneration across environmental gradients in the US northern Rockies. *Landscape Ecology*, 31(3), 619-636.
- Knight, D. H., Vose, J. M., Baldwin, V. C., Ewel, K. C., Grodzinska, K., & Grodzinska, K. (1994). Contrasting patterns in pine forest ecosystems. *Ecological Bulletins*, 9-19.
- Kollmann, J., Córdova, J. P., & Andersen, R. M. (2008). Factors limiting regeneration of an endangered conifer in the highlands of Guatemala. *Journal for Nature Conservation*, 16(3), 146-156.
- Lucas-Borja, M. E., Madrigal, J., Candel-Pérez, D., Jiménez, E., Moya, D., de las Heras, J., Guijarro, M., Vega, J. A., Fernández, C. & Hernando, C. (2016). Effects of prescribed burning, vegetation treatment and seed predation on natural regeneration of Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*) in pure and mixed forest stands. *Forest Ecology and Management*, 378, 24-30.
- Littell, J. S., Peterson, D. L., Riley, K. L., Liu, Y., & Luce, C. H. (2016). A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. *Global change biology*.
- 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 mixedwood site. *Forest ecology and management*, 258(7), 1225-1234.

- Martínez, O. J. A., & González, D. Y. C. (2006). ALUVIALES: PARCELA VS. PUNTO-CUADRANTE. *Acta Científica*, 20(1-3), 63-66.
- McKenzie, D., Gedalof, Z. E., Peterson, D. L., & Mote, P. (2004). Climatic change, wildfire, and conservation. *Conservation biology*, 18(4), 890-902.
- Meng, R., Dennison, P. E., Huang, C., Moritz, M. A., & D'Antonio, C. (2015). Effects of fire severity and post-fire climate on short-term vegetation recovery of mixed-conifer and red fir forests in the Sierra Nevada Mountains of California. *Remote Sensing of Environment*, 171, 311-325.
- Mitchell, K. (2010). Quantitative analysis by the point-centered quarter method. *arXiv preprint arXiv:1010.3303*.
- Ogawa-Onishi, Y., Berry, P. M., & Tanaka, N. (2010). Assessing the potential impacts of climate change and their conservation implications in Japan: A case study of conifers. *Biological Conservation*, 143(7), 1728-1736.
- Oliver, P. A. T. (2007). Dinámica de regeneración de " *Pinus nigra*" subsp. " *salzmannii*" al sur de su área de distribución: etapas, procesos y factores implicados. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 16(2), 124-135.
- Omi, P. N. (2005). *Forest fires: a reference handbook*. ABC-CLIO.
- Ouzts, J., Kolb, T., Huffman, D., & Meador, A. S. (2015). Post-fire ponderosa pine regeneration with and without planting in Arizona and New Mexico. *Forest Ecology and Management*, 354, 281-290.
- Parmesan, C., y G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Parry, M. L. (Ed.). (2007). *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the fourth assessment report*

of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 4). Cambridge University Press.

- Peñuelas, J., Ogaya, R., Boada, M., & S Jump, A. (2007). Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30(6), 829-837.
- 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.
- Ren, Q., Yang, X., Cui, G., Wang, J., Huang, Y., Wei, X., & Li, Q. (2007). Smith fir population structure and dynamics in the timberline ecotone of the Sejila Mountain, Tibet, China. *Acta Ecologica Sinica*, 27(7), 2669-2677.
- 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.
- 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.
- Root, T. L., J. T. Price, K. R. Hall, S. H. Schneider, C. Rosenzweig & J. A. Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*. 421, 57-60.
- Rooney, T. P., Solheim, S. L., & Waller, D. M. (2002). Factors affecting the regeneration of northern white cedar in lowland forests of the Upper Great Lakes region, USA. *Forest Ecology and management*, 163(1), 119-130.
- 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.

- 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.
- Sawada, Y., Aiba, S. I., Seino, T., & Kitayama, K. (2016). Size structure, growth and regeneration of tropical conifers along a soil gradient related to altitude and geological substrates on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant and Soil*, 1-12.
- Smith, K.W., M.J. Germino, D.M. Johnson, K. Reinhardt. 2009. The altitude of alpine treeline: a bellwether of climatic change effects. *Bot. Rev.* 75, 163-190.
- St-Denis, A., Kneeshaw, D., & Bergeron, Y. (2010). The role of gaps and tree regeneration in the transition from dense to open black spruce stands. *Forest ecology and management*, 259(3), 469-476.
- Stoffel, M. (Ed.). (2010). *Tree rings and natural hazards: a state-of-art* (Vol. 41). Springer Science & Business Media.
- Tang, C.Q., He, L.Y., Su, W.H., Zhang, G.F., Wang, H.C., Peng, M.C., Wu, Z.L. & Wang, C.Y. (2013). Regeneration, recovery and succession of a *Pinus yunnanensis* community five years after a mega-fire in central Yunnan, China. *For. Ecol. Manag.*, 294: 188-196.
- 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.
- Vega, J. A., Fernández, C., Pérez-Gorostiaga, P., & Fonturbel, T. (2008). The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain). *Forest Ecology and Management*, 256(9), 1596-1603.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic

variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 836-842.

Wang, T., Liang, Y., Ren, H., Yu, D., Ni, J., & Ma, K. (2004). Age structure of *Piceaschrenkiana* forest along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China. *Forest Ecology and Management*, 196(2), 267-274.

Williams, A.P., Allen, C.D., Macalady, A.K., Griffin, D., Woodhouse, C.A., Meko, D.M. et al. (2013). Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nat. Clim. Chang*, 3, 292–297.

Zald, H. S., Gray, A. N., North, M., & Kern, R. A. (2008). Initial tree regeneration responses to fire and thinning treatments in a Sierra Nevada mixed-conifer forest, USA. *Forest Ecology and Management*, 256(1), 168-179.

Regeneration of *Pinus hartwegii* and its relation with fire in an elevation gradient

Cortés Cabrera¹ H., Jurado E.¹, Pompa García M.², Aguirre Calderón O.¹, Pando Moreno M.¹, González Tagle M.¹

1. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, CP 67700, Carretera Nacional 145, Linares, Nuevo León, México.
2. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez Estado de Durango, Rio Papaloapan y Blvd. Durango, Col. Valle del Sur, CP 34120, Durango, México.

Keywords:

Pinus hartwegii, Regeneration, Fire scars, Density of plants, Age regeneration.

Abstract

Regeneration is directly affected by environmental conditions such as light, water availability and fires among other variables. These conditions affect regeneration patterns and patterns in turn affect the composition and abundance of forests, these changes are recorded in the age structure of the forest and through the growth tree-rings of adult trees. Due to the altitudinal migration of temperatures according to forecasts of climate change, it is expected that species will migrate along with the temperatures to higher elevations. We compared the regeneration of *Pinus hartwegii* in the elevation gradient of the species (3,050, 3,225 y 3400m in elevation), and compared the number of adult individuals with fire scars and regeneration.—Regeneration was sampled in plots, while adult individuals were sampled by the point centered quarter method. Density of adult individuals and regeneration were higher at lower elevations, while individuals with fire scars showed similar density across elevations. No correlation was detected between regeneration and the number of plants with fire scars, but a positive correlation was found between the density of adult individuals and regeneration.

Introduction

Regeneration is the means by which plants move and germinate in those areas where conditions are suitable for their growth (Harper, 1978; Baskin & Baskin, 2001; Fenner & Thompson, 2005). Regeneration in an area that has been affected by fire depends on many limiting factors such as water availability, temperature, light, availability of seeds and seed predators (Harper, 1978; Baskin & Baskin, 2001; Rooney et al., 2002; Benech *et al.*, 2004; Fenner & Thompson, 2005). Many variables influence frequency and intensity of forest fires (Kollmann et al., 2008; Brown et al., 2011) and these in turn can inhibit or promote regeneration of conifers (Hidalgo, 2003).

Post fire environmental conditions influence patterns of regeneration (Bonnet et al., 2005). For some conifers rising temperatures and droughts can inhibit regeneration following a fire, so that the composition and structure of forests may vary (Bonnet et al., 2005; Rother et al., 2015). Savage et al. (2013) found that the ability to regenerate becomes smaller with increasing drought periods. Elevation and associated temperature, greatly affect plant regeneration (Viveros & Viveros, 2009; Chamber et al., 2016). Due to the altitudinal migration of temperatures according to forecasts of climate change, it is expected that species will migrate along with temperatures to higher elevations (Parmesan & Yohe, 2003; Root et al., 2003; Holtmeier et al., 2005).

Fires affect the composition and abundance of forests (Brown et al., 2011; Williams et al., 2013), and in some regions fires have been more frequent in recent decades (Williams et al 2013). Some authors found a relationship between increased temperature and increased frequencies of fires (McKenzie et al., 2004). In the next decades fire activity may decrease in some areas, but increase in others according to some forecasts (Omi, 2005). Other authors argue that climate change does not determine the fire regime directly, because other variables involved are more influential (Keeley & Syphard, 2016; Littell et al., 2016). Among the variables involved in fire, one of the most important ones is human impact, either increasing or decreasing fire frequency through forest management reducing

fuel or by changes in land use and management (Keeley & Syphard, 2016). Fires change the composition and structure of forests (Omi, 2005). Fires affect age structure of a tree population and the growth rings of adult trees (Bosch et al., 1992). For some species, fire causes an increase in seed germination (Knight et al., 1994; Hidalgo, 2003). Rodriguez & Fulé (2003) argue that *Pinus hartwegii* presents adaptations to fires, such as post fire abundant regeneration, ability to regrow buds, thick crust protection and foliage recovery.

In a study by Ávila et al. (2014), in which the fire history was reconstructed for the study area of this paper, it is established that the last high-intensity fire occurred in 1998, with no further records of severe fires. In here we aim at contributing to the understanding of the effects of climate change and fire regimes for conservation of natural areas as proposed by Haire & McGarigal (2008). The objectives of this study for *Pinus hartwegii* at the highest mountain in Northeastern Mexico were (1) to investigate the relationship between regeneration and fire scars in adult trees; (2) to compare regeneration and evidence of fire at different elevations; and, (3) to determine the relationship between regeneration and density of adult trees.

Materials and methods

Study area

This study was conducted in the mountain Cerro El Potosí, located in the northeastern region of Mexico in the state of Nuevo Leon (INEGI, 1986). It is part of Sierra Madre Oriental in the sub physiographic region of the Gran Sierra Plegada, it is the highest mountain in Northeastern Mexico (from 1,800 m above sea level (a.s.l.) to the 3660 m a.s.l.) (INEGI, 1986). Climates present in the study area are semi cold subhumid, temperate subhumid (García et al., 1998). It includes temperate coniferous forests, mixed pine and oak forests, oak scrub and subalpine vegetation and alpine meadow at the top (García et al., 1998). Some common species are *Pinus culminicola*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus hartwegii*, *Populus tremuloides*, *Abies vejarii* and *Pseudotsuga menziesii* (Aguirre et al., 2003). *Pinus*

Hartwegii distribution is recorded from 2,800 to 3,600 m a.s.l., although it differs depending on the exposure and it is narrower on the east side (Aguirre *et al.*, 2003). In Central Mexico the species reaches up to 4,000 m a.s.l. (Beaman & Andersen 1966; Farjon *et al.*, 1997).

Sampling

Sampling was carried out from April 2014 to May 2015. To determine the number of trees with evidence of fire, 5 elevations were chosen along the distribution of the species. Only forest stands >400 m length and with a slope <45° were considered at the East side of Cerro El Potosí. Only three of these elevations complied with the above criteria (3,050, 3,225 y 3,400 m a.s.l.). At 2,875 m a.s.l., stands were insufficient and at 3,575 meters there were no individuals of the species. In the latter area a severe fire ended the populations of *P. hartwegii* and *P. culminicola* (Aguirre *et al.*, 2003). In these elevations all individuals with a diameter at breast height (DBH)>7.5 cm were recorded using the point centered quarter method (Cottam and Curtis, 1956) which is more efficient than the traditional method of plots (Cottam & Curtis, 1956; Martínez & González, 2006). This method consists of a series of points along a transect in which each of these is the center of imaginary quadrates, following the cardinal points (north-south and east-west), two imaginary intersecting lines are drawn and each of the resulting distance to the quadrants center is measured to the nearest tree, for a total of 4 trees per point centered quarter (Cottam & Curtis, 1956; Mitchell, 2010). For each of the three elevations, five sites were made and at each of these sites, 10 points centered quarters were established. A total of 200 trees per elevation (600 in total) were measured, for each the distance to the center point and scars that evidenced the existence of fire were determined, as well as the density of adult individuals.

Regeneration was measured with two plots of 75 m² each site, with a total of 10 per elevation. Within each quadrant all individuals of the species were measured, from newly germinated to those with a DBH <7.5 cm. For each individual the number of nodes with branches was determined to estimate age.

Data analysis

The response variables in this study were tree density, density of trees fire scars and the regeneration of the species expressed in absolute numbers and densities; correlation tests were conducted to determine the correlation between the number of burned trees and regeneration. In addition ANOVAS were made to determine whether there were differences between the number of burned trees and elevation, and between regeneration and elevation. Correlation tests were performed between the density of adult individuals and regeneration. The data obtained were analyzed using R software version 2.15.0, normality tests were done with Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov for all data, and Pearson correlation tests were performed accordingly. A Kruskal wallis analysis were performed for data that did not meet normal distribution criteria.

Results

The number of trees with fire scars was similar across elevations ($P=0.051$). Perhaps fire intensity in recent years has been similar for the three elevations. There were on average from 10 to 15 (25 and 37%) individuals with fire scars per sampled plot (Fig. 1). The number of trees with fire scars at 3,225 m a.s.l. showed a standard error much higher than the upper and lower elevation, which indicates a high variability in this elevation (Fig. 1).

Regeneration varied with elevation, with more individuals (3,000 per ha) at the lower elevation (3,050 m a.s.l.), than at the higher ones (533 and 667 individuals per ha (Fig. 2). The density of adult individuals differed between elevations ($P=0.002$) (Fig. 3). Density at 3,050 m elevation was greater than the density of the elevation 3,400 m ($P=0.001$), while the central elevation did not differ with the higher and lower elevations.

No correlation was detected between regeneration and the number of trees with fire scars ($r^2=0.32$, $P>0.05$). It is evident that moderate fires (those that can be detected in damaged living trees, i.e. fires that did not kill the trees) do not promote or inhibit regeneration. The comparison between the density of adult

individuals and regeneration, showed correlation, in which, with a higher density of adult individuals a higher regeneration was found (Fig. 4), but with a high dispersion of data ($r^2 = 0.43$, $P=0.017$). Most young individuals found in the lower 3,050 m a.s.l. elevation and between 0 and 4 years ($p<0.01$) (Fig. 5) the upper elevations showed no differences between segments.

Discussion

Post fire regeneration

Post fire regeneration is sensitive to various factors and can provide critical information to understand the response to forest fires, such as the composition and structure of the forest and help project subsequent forest dynamics (Bonnet et al., 2005; Han et al., 2015). Mild and moderate fires in *Pinus hartwegii* communities have been found to promote regeneration (Rodríguez et al., 2001). This is in contrast to our results, since no direct relationship was found between evidence of low and medium intensity fires with regeneration in our study. The size and intensity of fires and subsequent climatic conditions affect ecosystem recovery (Meng et al., 2015). Crotteau et al. (2013) found that regeneration of conifers benefits from low and medium intensity fires. The same has been found for regeneration of *Populus tremuloides* (Wang et al., 2014), *Pinus pinaster* (Vega et al., 2008), *P. sylvestris* (Beghin et al., 2010) and *P. yunnanensis* (Tang et al., 2013; Chen et al., 2014), while reducing regeneration of *P. nigra* (Borja et al., 2016) and *P. pinaster* (Fernandez et al., 2007) in other studies. Ouzts et al. (2015) found that natural regeneration for *Pinus ponderosa* did not increase until after 10 years from a fire. Perhaps *P. hartwegii* behaves like *P. ponderosa*, since most individuals found were between 0 and 10 y old, but mainly younger than 4 y. The last high intensity fire registered for the study area was in 1998 (Flores et al., 2015). Allen et al., (2010) found that mortality of individuals regenerating after fire is due to decreased water availability by increasing temperatures. Rother et al., (2015) found similar data for *P. ponderosa*, while Savage (2013) found that the capacity of *P. ponderosa* to regenerate is reduced because droughts are increasingly longer.

Similar results have been found for *P. Lambertiana* and *P. jeffreyi* (Zald et al., 2008).

In those areas where there were no living individuals perhaps as a result of strong fire intensity, *Pinus ponderosa* regeneration was greater closer to the line of surviving trees (Chambers et al., 2016). Christopouloa et al., (2014) found similar results for *P. nigra* with higher regeneration closer to not burned areas. In areas of the Cerro El Potosí closer to the line of surviving trees, there was no regeneration of *P. hartwegii* or other woody species. Severely burned soils may be the cause of the lack of regeneration after strong fires (Vacchiano et al., 2014).

Elevation

In Cerro El Potosí a considerable reduction in the distribution of *P. hartwegii* can be detected, remaining now only in the former mid elevation, with few individuals at the low elevation and none at the higher elevations. According to the results obtained by Gutiérrez & Trejo (2014) *P. hartwegii* may lose 80% of its current distribution by 2050. Elevation is one of the main factors influencing regeneration (Chambers et al. 2016). *Pinus ponderosa* regeneration is abundant at higher elevations (Ouzts et al., 2015; Chambers et al., 2016) while for this study *P. hartwegii* did not occur at higher elevations. Petrie et al., (2016) found that *Pinus ponderosa* and *P. contorta* had a greater regeneration in areas with average temperatures between 20°C and 25°C, at the lowest end of the species distribution. This is in contrast with findings by Rother et al. (2015) for *P. ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*, whose regeneration at lower elevations may be inhibited due to drought and high temperatures caused by global warming. Erickson et al. (2015) found a large decline in conditions suitable for regeneration in Alberta Canada. In projections made for forests of Japan, it is forecast that the altitudinal limit will move upward about 293 meters, causing local extinctions of alpine species (Ogawa-Onishi et al., 2010). In the case of this study, the regeneration was greater at lower elevations, therefore a displacement of the species at higher elevations would be difficult due to the possible decrease of germplasm caused by fires.

Cover

After a fire, mixed conifer forests have been found to be more resilient than pure forests (Kemp et al., 2016). Meng et al. (2015) found that mixed forests tend to recover faster than pure forests of *Abies magnifica*. Calvo et al. (2003) argue that the regeneration of *P. pinaster* after a fire is higher in mixed forests dominated by *Quercus* than in pure forests. In our study a higher density (and therefore a higher cover) of adult individuals in the lower elevations was found. An abundant cover may assist regeneration (Kemp et al., 2016), because delaying evaporation (Vacchiano et al., 2014). This is in agreement with findings in this study, since a relationship between the density of adult individuals and regeneration was found, with a greater regeneration at a higher density. Although other authors have found a greater survival after forest thinning (Man et al, 2009). Perhaps this is only relevant in high density stands and not in our study area.

Conclusions

No direct relationship was found between number of individuals with fire scars and regeneration of *Pinus hartwegii*. There were perhaps one or more other variables affecting regeneration at different elevations. The number of trees with evidence of fire was similar at the three sampled elevations (25% to 37%). Contrary to our expectations a higher density of young individuals was found at the lower elevation (3,050 m a.s.l.) than at higher elevations (3,225 and 3,400 m a.s.l.). A greater regeneration was found at places with a higher density of adult individuals.

References

- Aguirre Calderón, Ó. 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).
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), 95-111.

Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., González, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A. & Cobb, N. (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684.

Ávila Flores, Diana Yemilet, González Tagle, Marco Aurelio, Jiménez Pérez, Javier, Aguirre Calderón, Oscar Alberto, Treviño Garza, Eduardo Javier, & Vargas Larreta, Benedicto. (2014). Dendrochronopyrology: analysis of the morphological evidence of forest fires. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(21), 136-147.

Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (1998). *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Elsevier.

Beaman, J. H., & Andresen, J. W. (1966). The vegetation, floristics and phytogeography of the summit of Cerro Potosí, Mexico. *American Midland Naturalist*, 1-33.

Beghin, R., Lingua, E., Garbarino, M., Lonati, M., Bovio, G., Motta, R., & Marzano, R. (2010). *Pinus sylvestris* forest regeneration under different post-fire restoration practices in the northwestern Italian Alps. *Ecological Engineering*, 36(10), 1365-1372.

Benech-Arnold, R. L., & Sanchez, R. A. (2004). *Handbook of seed physiology: applications to agriculture*. Food Products Press.

Bonnet, V. H., Schoettle, A. W., & Shepperd, W. D. (2005). Postfire environmental conditions influence the spatial pattern of regeneration for *Pinus ponderosa*. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(1), 37-47.

- Bosch, O., Giné, L., Ramadori, E. D., Bernat, A., & Gutiérrez, E. (1992). Disturbance, age and size structure in stands of *Pinus uncinata* Ram. *Pirineos*, *140*, 5-14.
- Brown, C. D., & Johnstone, J. F. (2012). Once burned, twice shy: Repeat fires reduce seed availability and alter substrate constraints on *Picea mariana* regeneration. *Forest Ecology and Management*, *266*, 34-41.
- Calvo, L., Santalla, S., Marcos, E., Valbuena, L., Tárrega, R., & Luis, E. (2003). Regeneration after wildfire in communities dominated by *Pinus pinaster*, an obligate seeder, and in others dominated by *Quercus pyrenaica*, a typical resprouter. *Forest Ecology and Management*, *184*(1), 209-223.
- 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.
- Chen, W., Moriya, K., Sakai, T., Koyama, L., & Cao, C. (2014). Post-fire forest regeneration under different restoration treatments in the Greater Hinggan Mountain area of China. *Ecological Engineering*, *70*, 304-311.
- 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.
- Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, *37*(3), 451-460.
- Crotteau, J. S., Varner, J. M., & Ritchie, M. W. (2013). Post-fire regeneration across a fire severity gradient in the southern Cascades. *Forest Ecology and Management*, *287*, 103-112.

- 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.
- Farjon, A., de la Rosa, J. A. P., & Styles, B. T. (1997). *Guía de campo de los pinos de México y América Central*. Royal Botanic Gardens.
- Fenner, M., & Thompson, K. (2005). *The ecology of seeds*. Cambridge University Press.
- Fernández, C., Vega, J. A., Fonturbel, T., Jiménez, E., & Pérez-Gorostiaga, P. (2008). Effects of wildfire, salvage logging and slash manipulation on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in Orense (NW Spain). *Forest Ecology and Management*, 255(3), 1294-1304.
- García, A., Mario, 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.
- Guitérrez, 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.
- Haire, S. L., & McGarigal, K. (2008). Inhabitants of landscape scars: succession of woody plants after large, severe forest fires in Arizona and New Mexico. *The Southwestern Naturalist*, 53(2), 146-161.
- 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.
- Harper, J. L., 1978. Population biology of plants. London: *Academic press*.

- Hidalgo, J. V. (2003). Regeneración del género *Pinus* tras incendios. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (15).
- 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.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1986). Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. México.
- Kayes, L. J., Anderson, P. D., & Puettmann, K. J. (2010). Vegetation succession among and within structural layers following wildfire in managed forests. *Journal of Vegetation Science*, 21(2), 233-247.
- Keeley, J. E., & Syphard, A. D. (2016). Climate Change and Future Fire Regimes: Examples from California. *Geosciences*, 6(3), 37.
- Kemp, K. B., Higuera, P. E., & Morgan, P. (2016). Fire legacies impact conifer regeneration across environmental gradients in the US northern Rockies. *Landscape Ecology*, 31(3), 619-636.
- Knight, D. H., Vose, J. M., Baldwin, V. C., Ewel, K. C., Grodzinska, K., & Grodzinska, K. (1994). Contrasting patterns in pine forest ecosystems. *Ecological Bulletins*, 9-19.
- Kollmann, J., Córdova, J. P., & Andersen, R. M. (2008). Factors limiting regeneration of an endangered conifer in the highlands of Guatemala. *Journal for Nature Conservation*, 16(3), 146-156.
- Lucas-Borja, M. E., Madrigal, J., Candel-Pérez, D., Jiménez, E., Moya, D., de las Heras, J., Guijarro, M., Vega, J. A., Fernández, C. & Hernando, C. (2016). Effects of prescribed burning, vegetation treatment and seed predation on natural regeneration of Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii*)

in pure and mixed forest stands. *Forest Ecology and Management*, 378, 24-30.

Littell, J. S., Peterson, D. L., Riley, K. L., Liu, Y., & Luce, C. H. (2016). A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. *Global change biology*.

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 mixedwood site. *Forest ecology and management*, 258(7), 1225-1234.

Martínez, O. J. A., & González, D. Y. C. (2006). ALUVIALES: PARCELA VS. PUNTO-CUADRANTE. *Acta Científica*, 20(1-3), 63-66.

McKenzie, D., Gedalof, Z. E., Peterson, D. L., & Mote, P. (2004). Climatic change, wildfire, and conservation. *Conservation biology*, 18(4), 890-902.

Meng, R., Dennison, P. E., Huang, C., Moritz, M. A., & D'Antonio, C. (2015). Effects of fire severity and post-fire climate on short-term vegetation recovery of mixed-conifer and red fir forests in the Sierra Nevada Mountains of California. *Remote Sensing of Environment*, 171, 311-325.

Mitchell, K. (2010). Quantitative analysis by the point-centered quarter method. *arXiv preprint arXiv:1010.3303*.

Ogawa-Onishi, Y., Berry, P. M., & Tanaka, N. (2010). Assessing the potential impacts of climate change and their conservation implications in Japan: A case study of conifers. *Biological Conservation*, 143(7), 1728-1736.

Oliver, P. A. T. (2007). Dinámica de regeneración de " *Pinus nigra*" subsp. " *salzmannii*" al sur de su área de distribución: etapas, procesos y factores implicados. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 16(2), 124-135.

- Omi, P. N. (2005). *Forest fires: a reference handbook*. ABC-CLIO.
- Ouzts, J., Kolb, T., Huffman, D., & Meador, A. S. (2015). Post-fire ponderosa pine regeneration with and without planting in Arizona and New Mexico. *Forest Ecology and Management*, 354, 281-290.
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rooney, T. P., Solheim, S. L., & Waller, D. M. (2002). Factors affecting the regeneration of northern white cedar in lowland forests of the Upper Great Lakes region, USA. *Forest Ecology and management*, 163(1), 119-130.
- Root, T. L., Price, J. T., Hall, K. R., Schneider, S. H., Rosenzweig, C., & Pounds, J. A. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 421(6918), 57-60.
- 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.

- 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.
- Tang, C.Q., He, L.Y., Su, W.H., Zhang, G.F., Wang, H.C., Peng, M.C., Wu, Z.L. & Wang, C.Y. (2013). Regeneration, recovery and succession of a *Pinus yunnanensis* community five years after a mega-fire in central Yunnan, China. *For. Ecol. Manag.*, 294: 188-196.
- 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.
- Vega, J. A., Fernández, C., Pérez-Gorostiaga, P., & Fonturbel, T. (2008). The influence of fire severity, serotiny, and post-fire management on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in three burnt areas in Galicia (NW Spain). *Forest Ecology and Management*, 256(9), 1596-1603.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 836-842.
- Wan, H. Y., Olson, A. C., Muncey, K. D., & Clair, S. B. S. (2014). Legacy effects of fire size and severity on forest regeneration, recruitment, and wildlife activity in aspen forests. *Forest Ecology and Management*, 329, 59-68.
- Williams, A.P., Allen, C.D., Macalady, A.K., Griffin, D., Woodhouse, C.A., Meko, D.M. et al. (2013). Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nat. Clim. Chang*, 3, 292–297.
- Zald, H. S., Gray, A. N., North, M., & Kern, R. A. (2008). Initial tree regeneration responses to fire and thinning treatments in a Sierra Nevada mixed-conifer forest, USA. *Forest Ecology and Management*, 256(1), 168-179.

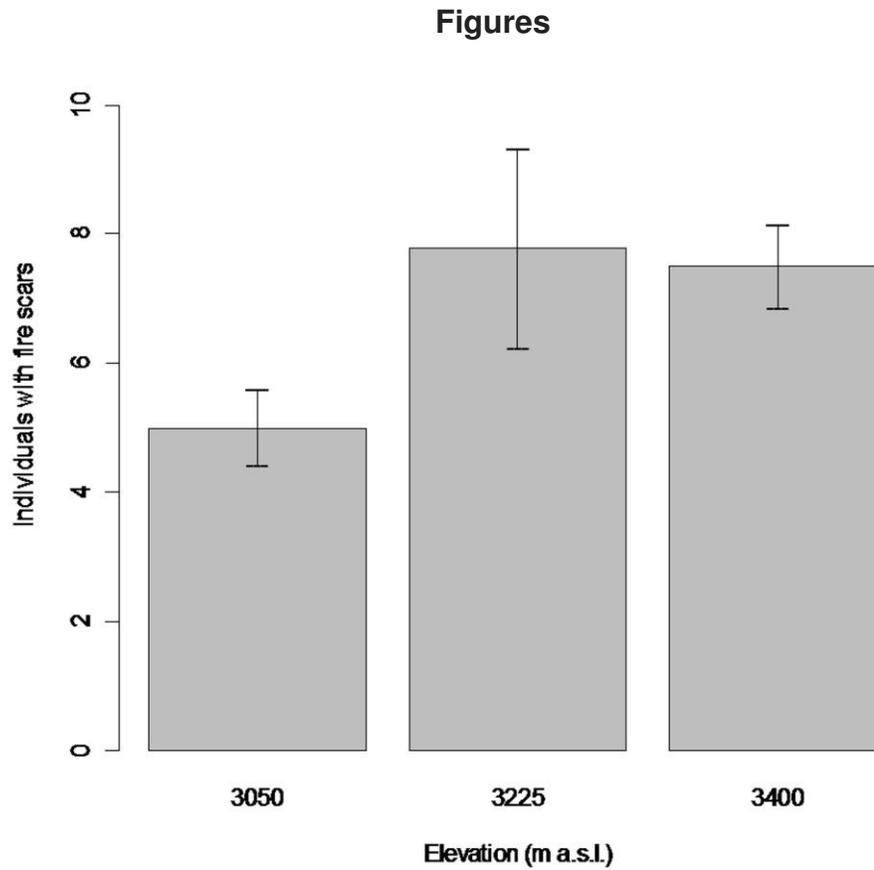


Fig. 1 -Number of individuals of *P. hartwegii* with fire scars (mean \pm se) at the three sampled elevations on the east side of Cerro El Potosí, Mexico were similar ($F= 4.16$; d.f.= 28; $P= 0.051$).

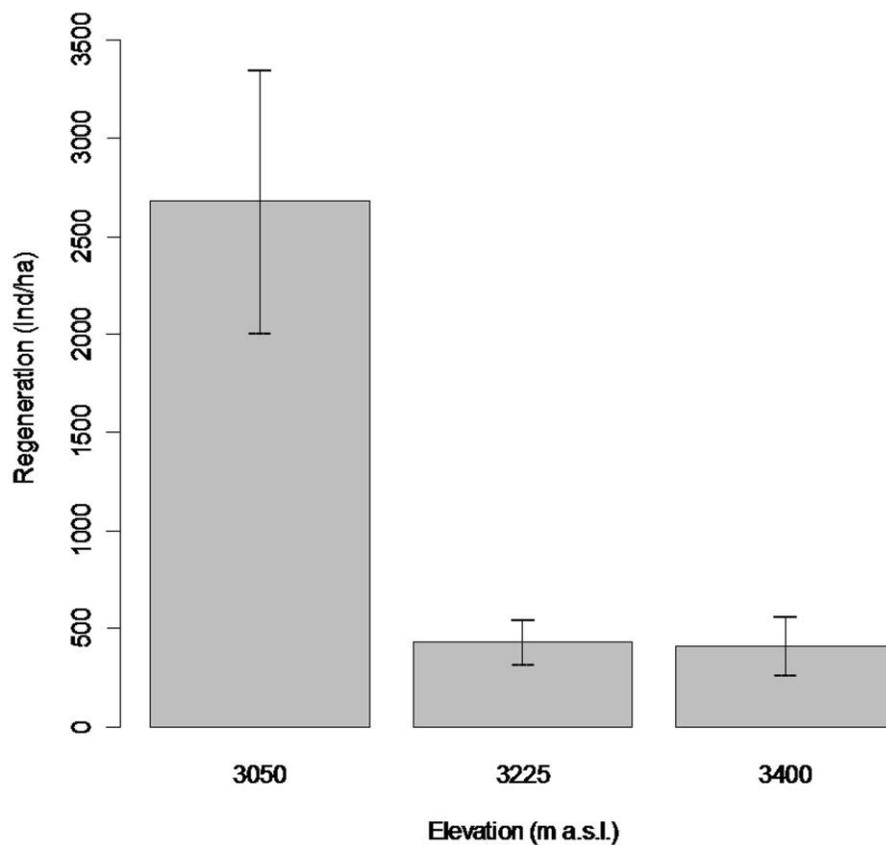


Fig. 2 –Density of young individuals (ND < 7.5 cm) of *P. hartwegii* in three elevation categories (mean \pm se). There were more individuals at the lowest elevation (Kruskal-wallis, chi-squared= 14.82, d. f. = 2, $P < 0.001$).

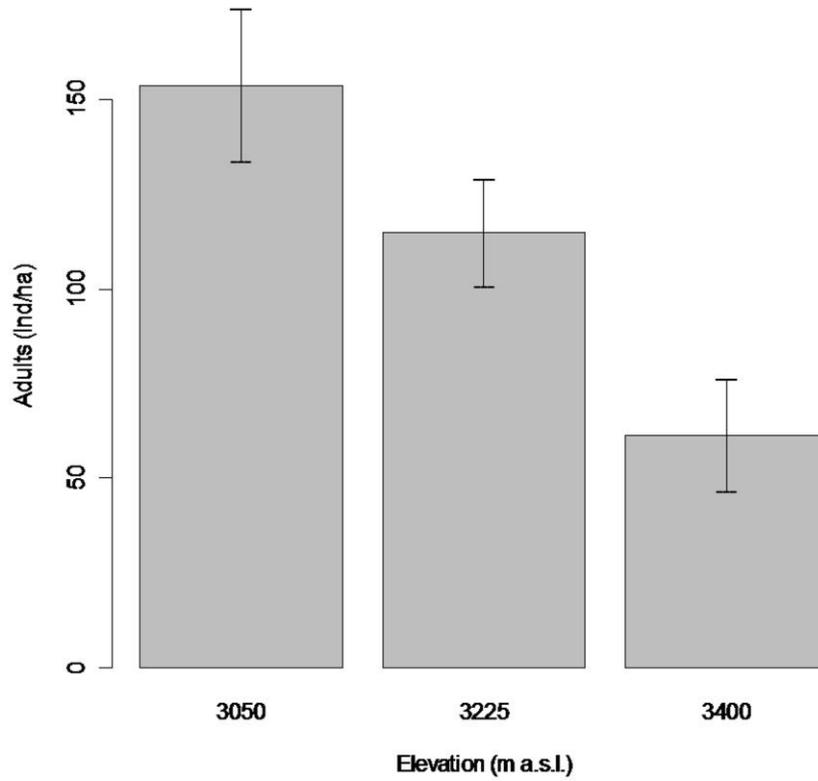


Fig. 3 - Densities of adult individuals (DBH > 7.5 cm) differed at the three elevation categories ($F= 7.55$; d.f.=27; $P= 0.002$).

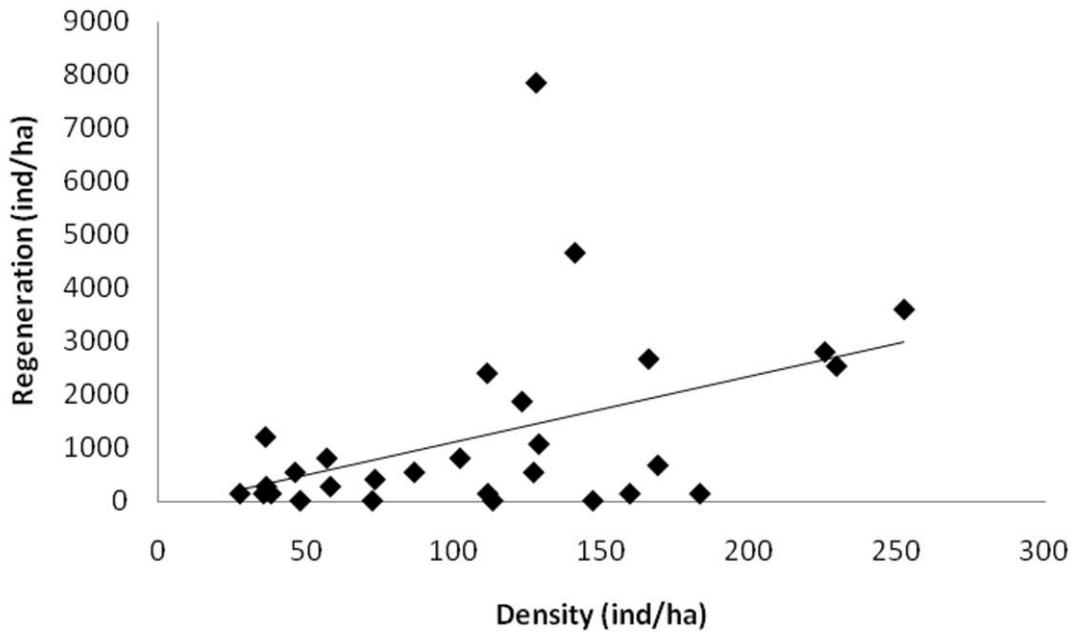


Fig. 4- Point spread density of adult individuals and regeneration ($r^2= 0.43$; d.f.= 27; $P=0.017$), regeneration increased to higher density of adult individuals.

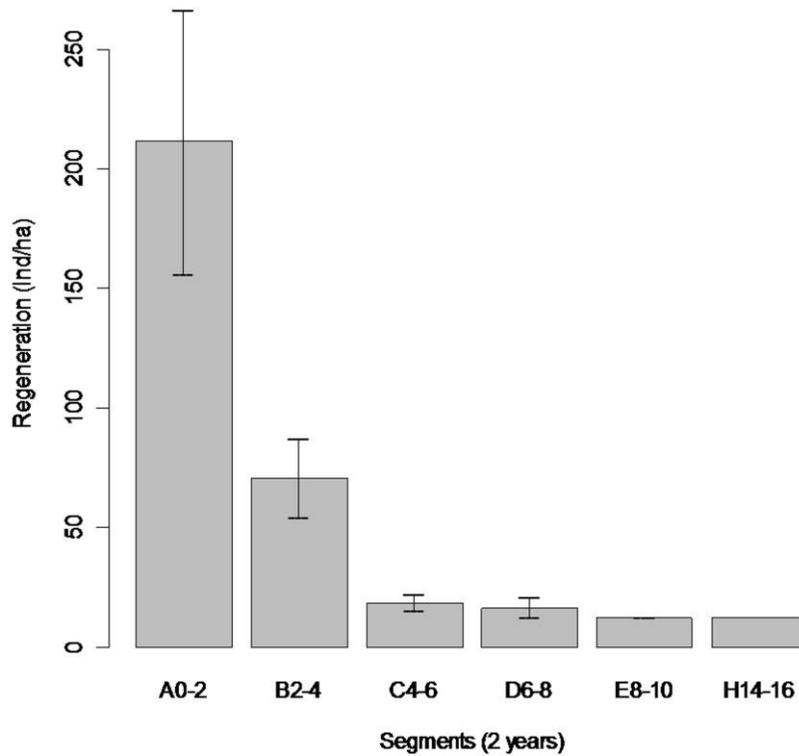


Fig. 5 - Comparison of regeneration by age category at 3,050 m elevation, in which a marked difference was found (Kruskal-wallis, chi-squared= 20.1, d. f. = 5, $P<0.001$). The age of regeneration was divided into categories of two years each, and compared with each other.

Observaciones

A pesar de los esfuerzos realizados en este documento, aún quedan muchas variables por analizar que son importantes para la obtención de datos más precisos, las cuales no fueron tomadas en cuenta ya sea por el tiempo que conlleva la toma de las mismas, las dificultades técnicas y/o económicas de las mismas. Una de las más importantes que influye de manera directa en el establecimiento de regeneración es el tiempo con agua disponible para las plantas. Para la cual es necesaria la determinación del tipo de suelo, perfiles de suelo y pruebas de infiltración en cada uno de los sitios, lo cual queda fuera de los límites de este estudio.

La falta de datos fidedignos sobre los incendios ocurridos (tipo, intensidad, ubicación y área) en el Cerro el Potosí y en general en todo el país, representa una dificultad de definir si las cicatrices de incendio ocurrieron en el último incendio o en incendios anteriores y por ende genera un sesgo sobre los análisis de regeneración. Contrario a los análisis hechos para algunas especies de pino en el cual se cuenta con datos detallados de los incendios.