

ESTADO ACTUAL DE LA ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DEL BOSQUE DE *Pinus culminicola* var. *culminicola* EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN EL CERRO EL POTOSÍ, GALEANA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

CURRENT STATUS OF THE STRUCTURE AND COMPOSITION OF THE *Pinus culminicola* var. *culminicola* FOREST IN AN ALTITUDINAL GRADIENT AT CERRO EL POTOSI, GALEANA, NUEVO LEON, MEXICO

Tovar-Cárdenas, Aldo; Homero Alejandro Gárate-Escamilla; Luis Gerardo Cuellar Rodríguez; Marisela Pando-Moreno, José Israel Yerena-Yamallel y Enrique Jurado-Ybarra

ESTADO ACTUAL DE LA ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DEL BOSQUE DE *Pinus culminicola* var. *culminicola* EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN EL CERRO EL POTOSÍ, GALEANA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

CURRENT STATUS OF THE STRUCTURE AND COMPOSITION OF THE *Pinus culminicola* var. *culminicola* FOREST IN AN ALTITUDINAL GRADIENT AT CERRO EL POTOSI, GALEANA, NUEVO LEON, MEXICO



Estado actual de la estructura y composición del bosque de *Pinus culminicola* var. *culminicola* en un gradiente altitudinal en el Cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León, México

Current status of the structure and composition of the *Pinus culminicola* var. *culminicola* forest in an altitudinal gradient at Cerro El Potosí, Galeana, Nuevo Leon, Mexico

Tovar-Cárdenas, Aldo;
Homero Alejandro Gárate-Escamilla;
Luis Gerardo Cuellar Rodríguez;
Marisela Pando-Moreno,
José Israel Yerena-Yamallel
y Enrique Jurado-Ybarra

ESTADO ACTUAL DE LA
ESTRUCTURA Y
COMPOSICIÓN DEL
BOSQUE DE *Pinus*
culminicola var. *culminicola*
EN UN GRADIENTE
ALTITUDINAL EN EL
CERRO EL POTOSÍ,
GALEANA, NUEVO LEÓN,
MÉXICO

CURRENT STATUS OF THE
STRUCTURE AND
COMPOSITION OF THE
Pinus culminicola var.
culminicola FOREST IN AN
ALTITUDINAL GRADIENT
AT CERRO EL POTOSÍ,
GALEANA, NUEVO LEON,
MEXICO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 56: 65-83. Julio 2024

DOI:
10.18387/polibotanica.58.5

Aldo Tovar-Cárdenas <https://orcid.org/0000-0002-1625-510X>

Homero Gárate-Escamilla

Autor de correspondencia: hgaratesc@uanl.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2060-1463>

Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez <https://orcid.org/0000-0003-4969-611X>

Marisela Pando-Moreno <https://orcid.org/0000-0001-5122-175X>

José Israel Yerena-Yamallel <https://orcid.org/0000-0002-9216-7427>

Enrique Jurado-Ybarra <https://orcid.org/0000-0002-4043-5549>

*Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León,
Linares, Nuevo León, México*

RESUMEN: Las variaciones climáticas modifican la distribución de las especies en los bosques templados, afectando su composición, estructura, riqueza, crecimiento y regeneración. El Cerro El Potosí ha experimentado múltiples eventos de origen antrópico que han ocasionado una degradación y reducción en la cobertura vegetal, afectando y aminorando las poblaciones de *Pinus culminicola* Andresen & Beaman. El objetivo fue determinar la composición, estructura, diversidad, dasometría y regeneración de especies en el área de distribución del *Pinus culminicola* en un gradiente altitudinal (3190 a 3700 msnm) en el Cerro El Potosí. Se establecieron 12 sitios circulares de 400 m² distribuidos en 4 pisos altitudinales. Se determinaron los índices de valor de importancia (IVI), de riqueza de especies (Simpson, Shannon-Weiner y de Margalef), los parámetros dasométricos (altura, diámetro de fuste y área de copa) y la regeneración natural. Para el análisis de la información se utilizaron las pruebas de Levene, Shapiro-Wilk, ANOVA y Tukey. Se encontró que la familia *Pinaceae* es la más abundante, con cuatro especies. La diversidad de especies es baja en las altitudes más altas y aumenta gradualmente a medida que la altitud disminuye. Las especies con mayor IVI en cada piso altitudinal fueron las siguientes: 1) a 3190 msnm: *Pinus hartwegii*; 2) a 3300 msnm: *Pinus culminicola*; 3) a 3500 y 3700 msnm: *Pinus hartwegii* y *Pinus culminicola* tuvieron valores similares. Los parámetros dasométricos mostraron que los tamaños *P. culminicola* y *P. hartwegii* disminuyen con la altitud, siendo los 3500 msnm en donde se presentaron los individuos más grandes. La densidad de árboles adultos es mayor que los jóvenes en todas las altitudes, por lo que el estado de regeneración es bajo. Se concluye que en el Cerro El Potosí, el aumento de la altitud tiene un efecto en las variables estudiadas de abundancia y riqueza. Lo encontrado en el presente trabajo pudieran orientar futuros estudios que incluyan planes de manejo y conservación.

Palabras clave: bosque templado; índice de valor de importancia; *Pinus*; regeneración.

SUMMARY: Climatic variations modify the distribution of species in temperate forests, affecting their composition, structure, richness, growth and regeneration. Cerro El Potosí has experienced multiple anthropogenic events that have caused a degradation and reduction in vegetation cover, affecting and reducing the populations of *Pinus culminicola* Andresen & Beaman. The objective was to determine the composition, structure, diversity, dasometry and regeneration of species in the distribution area of *Pinus culminicola* in an altitudinal gradient (3190

to 3700 masl) in Cerro El Potosí. Twelve circular sites of 400 m² distributed in 4 altitudinal levels were established. The importance value indexes (IVI), species richness (Simpson, Shannon-Weiner and Margalef), dasometric parameters (height, stem diameter and crown area) and natural regeneration were determined. Levene, Shapiro-Wilk, ANOVA and Tukey tests were used for data analysis. The *Pinaceae* family was found to be the most abundant, with four species. Species diversity is low at higher altitudes and gradually increases as altitude decreases. The species with the highest IVI at each altitudinal level were the following: 1) at 3190 masl: *Pinus hartwegii*; 2) at 3300 masl: *Pinus culminicola*; 3) at 3500 and 3700 masl: *Pinus hartwegii* and *Pinus culminicola* had similar values. The dasometric parameters showed that the sizes of *P. culminicola* and *P. hartwegii* decreased with altitude, with the largest individuals occurring at 3500 masl. The density of adult trees is higher than young trees at all altitudes, so the state of regeneration is low. It is concluded that in Cerro El Potosí, the increase in altitude influences the studied variables of abundance and richness. The findings of this study could guide future studies that include management and conservation plans.

Key words: temperate forest; importance value index; Pinus; regeneration.

INTRODUCCIÓN

En México los bosques templados exhiben una amplia diversidad de especies en el que los pinos y encinos son los más representativos, ocupando el 17.7% de la superficie nacional (CONAFOR, 2020). Dentro del territorio mexicano se distribuyen 94 especies de coníferas, de las cuales 43 son endémicas, en el caso específico de Nuevo León existen 24 especies, siendo el segundo estado con mayor diversidad de coníferas (Gernandt & Pérez-de la Rosa, 2014).

El estudio y conservación de la biodiversidad en ecosistemas montañosos ha sido un tema de interés creciente en las últimas décadas (Adhikari *et al.*, 2018; Egan & Price, 2017; García-García *et al.*, 2023). Estos ecosistemas, caracterizados por su singular topografía y aislamiento geográfico, albergan una gran diversidad de especies, principalmente coníferas, de las cuales muchas son endémicas y altamente vulnerables a las perturbaciones ambientales (Galicía *et al.*, 2018).

Diversas investigaciones señalan que las condiciones climáticas determinadas por el factor altitudinal pueden moldear la composición y estructura de las comunidades presentes en un determinado ecosistema y pueden servir de base para determinar estatus de una población, al respecto Speziale (2012) menciona, que estas comunidades y los ecosistemas se ven alterados por las variaciones climáticas, las cuales modifican la distribución de las especies. Tal efecto se agudiza en los gradientes de altitud, dado que, según la altitud, las condiciones ambientales como humedad y temperatura se disminuyen o se intensifican (Estrada, 2011). Lo anterior, produce una variación sobre el crecimiento de los árboles (Salzer *et al.*, 2014), teniendo un impacto significativo en diversas características tales como: 1) la composición y estructura de la vegetación (Holguín-Estrada *et al.*, 2021); 2) la densidad de individuos; 3) la riqueza de especies (Bhat *et al.*, 2020; García-García *et al.*, 2023); 4) el volumen de fuste y el área basal (Siles *et al.*, 2017; Velasco *et al.*, 2023); y 5) en la regeneración natural (Ribeiro *et al.*, 2022). Así, las especies que se distribuyen a diversas altitudes pueden desarrollar diversas estrategias ecológicas con el propósito de adaptarse de eficazmente a las variaciones climáticas presentes en distintas zonas verticales de los bosques de montaña (Zhang *et al.*, 2022).

El Cerro El Potosí es poseedor de una amplia diversidad de especies vegetales que varía según el nivel altitudinal en que se encuentren (Aguirre *et al.*, 2003; Estrada, 2011; García *et al.*, 1999; García-Arévalo & González-Elizondo, 1991). En este, se han identificado 81 especies vasculares y 30 familias, de las cuales 13 son endémicas (Beaman & Andresen, 1966). En cuanto a las coníferas presentes en la zona son: *Pinus culminicola* Andresen & Beaman var. *culminicola*, *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus arizonica* Engelm. var. *stormiae* Martínez, *Pinus strobiformis* Engelm., *Pinus greggii* Engelm., *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus teocote* Schltdl. & Cham., *Pinus nelsonii* Shaw, *Pseudotsuga menziessi* (Mirb.) Franco

var. *glauca* (Mayr) Franco, *Abies vejarii* Martínez var. *mexicana* (Martínez) T. S. Liu, *Juniperus zanonii* R. P. Adams y *Juniperus monosperma* (Engelm.) Sarg (Estrada, 2011; Estrada *et al.*, 2014).

El *P. culminicola* Andresen & Beaman var. *culminicola* del estudio en cuestión, es un árbol de porte arbustivo que generalmente puede medir de 2 a 3 metros y rara vez hasta 5 metros de altura, su ramificación es desde la base y con un follaje denso, sus estróbilos o conos son resinosos y flexibles en forma de diamante, con semillas duras tipo piñón, esta especie se distribuye desde los 3200 hasta los 3700 msnm (Estrada *et al.*, 2014; Rzedowski, 2006). El Cerro El Potosí ha experimentado múltiples eventos que han ocasionado una degradación y reducción en la cobertura vegetal (Manzanilla, 2017), como en *Pinus culminicola*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis*, *Pseudotsuga menziessi*, entre otras, sin embargo, las poblaciones de *P. culminicola* se han visto drásticamente reducidas en un 40%, quedando alrededor de 30 ha (Estrada *et al.*, 2014; García-Arévalo & González-Elizondo, 1991; Manzanilla, 2017; Sánchez *et al.*, 1987). No obstante, esta especie, presenta una distribución aislada en otras montañas de la Sierra Madre Oriental, como la Sierra de la Martha y en la Sierra La Viga en Coahuila (Estrada *et al.*, 2014; Manzanilla, 2017). A pesar de la importancia que tiene el entender la composición y estructura del ecosistema en diferentes altitudes, existen pocos estudios que evalúen o tomen en cuenta la diversidad y abundancia de las especies vegetales a lo largo de un gradiente altitudinal en el Cerro El Potosí (Aguirre *et al.*, 2003; Estrada, 2011; García *et al.*, 1999; Ramos, 2015). La falta de estudios resalta la necesidad de generar más información que pudiera ser de utilidad para futuras investigaciones. Por tanto, para el presente estudio se planteó la siguiente hipótesis de trabajo: a medida que se aumenta en altitud dentro de la distribución del *Pinus culminicola* var. *culminicola*, los valores de los parámetros de abundancia y riqueza de especies disminuyen. El objetivo general es determinar la composición y estructura, así como la diversidad, dasometría y regeneración de especies en el área de distribución del *Pinus culminicola* var. *culminicola* en un gradiente altitudinal con exposición Este del bosque templado en el Cerro El Potosí en el municipio de Galeana en el estado de Nuevo León, México.

MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se realizó en el Área Natural Protegida de competencia estatal (ANP) Cerro El Potosí ubicado en la Sierra Madre Oriental en Galeana, Nuevo León, entre las coordenadas geográficas 24° 52' 7" N y 100° 13' 55" O (Figura 1). El Cerro El Potosí posee una extensión territorial de 7,392 hectáreas, de las cuales 989 ha están designadas como ANP (García *et al.*, 1999). Además, posee un gradiente altitudinal de la montaña va desde los 2000 msnm, hasta los 3721 msnm (INEGI, 1986, 2017). Su tipo de suelo es litosol o protorendzina poco profundo (1-5 cm), es roca caliza, rico en contenido de materia orgánica y con un pH ligeramente alcalino (7.5). En la cima del cerro, las heladas son habituales y los vientos son intensos (Rzedowski, 2006). La temperatura promedio en esta región varía en un rango de 7 a 14°C, llegando a descender hasta -3 °C, la precipitación oscila entre los 400 a 500 mm (CONAGUA, 2015; IMTA, 2013; Ramos, 2015).

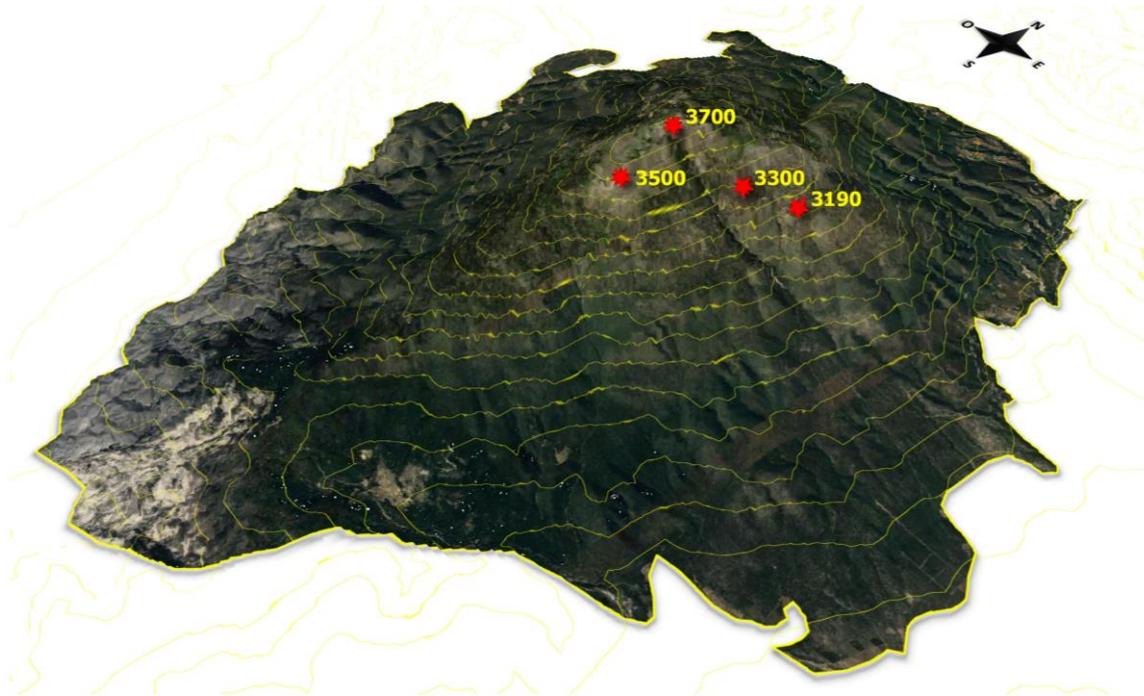


Figura 1. Sitos de muestreo en el Cerro El Potosí en Galeana, Nuevo León.
Figure 1. Sampling sites at Cerro El Potosí in Galeana, Nuevo León.

Sitios de muestreo

Para identificar el valor de importancia ecológica, la estructura vertical, la regeneración y la riqueza de especies, se establecieron 12 sitios circulares de 400 m² mediante un muestreo al azar (Alanís *et al.*, 2020) dentro de la distribución de la especie de *P. culminicola* y que no presentaran perturbación, distribuidos en cuatro niveles altitudinales en el Cerro El Potosí. El nivel 1 se encuentra a una altitud de 3190 msnm, ubicado entre las coordenadas geográficas 24° 52' 45" N y 100° 13' 8" O. El nivel 2 se localizó a los 3300 msnm, situado entre las coordenadas 24° 52' 25" N y 100° 13' 22" O. El nivel 3 se estableció a los 3500 msnm, entre las coordenadas 24° 51' 42" N y 100° 13' 47" O. Finalmente, el nivel 4 se posicionó a los 3700 msnm, entre las coordenadas 24° 52' 20" N y 100° 13' 54" O (Figura 1). En cada nivel altitudinal, se situaron tres parcelas con orientación Este. Se colectaron muestras de las especies vegetales que se encontraran dentro de los sitios para identificarlas en el laboratorio de botánica de la Facultad de Ciencias Forestales de la U.A.N.L.

Toma de datos

En cada parcela experimental, se registraron los siguientes parámetros dasométricos: el diámetro normal ($d_{1.30}$; cm), el diámetro de copa de Norte a Sur y de Este a Oeste (m) y la altura total (h; m). Para analizar la regeneración, se consideraron los individuos cuyo diámetro era igual o menor a (\leq) 7.5 cm, siguiendo la metodología de la CONAFOR (2018). El diámetro normal fue tomado con una cinta diamétrica marca Lufkin W606PM, el diámetro de copa se estimó con un longímetro marca Truper de 100 m modelo TEC-100ME y para la altura se utilizó un hipsómetro láser marca Nikon modelo Forestry Pro II.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Parámetros ecológicos

Para conocer el valor de importancia de las especies en el ecosistema, se calculó la abundancia (Ar), dominancia (Dr) y la frecuencia (Fr), a partir de estas variables se obtuvo el índice de valor de importancia (IVI), el cual obtiene valores en forma de porcentaje en una escala que va desde cero hasta cien (Alanís *et al.*, 2020; Mostacedo & Fredericksen, 2000). El IVI se obtiene al analizar las variables abundancia, dominancia, cobertura y frecuencia en un bosque (Tabla 1; López-Hernández *et al.*, 2017).

Índices de riqueza de especies

La riqueza de especies fue estimada con el índice de Simpson (λ), Shannon-Weiner (H') y de Margalef (D_{Mg}) (Tabla 1). Cada uno de estos índices proporciona una medida específica sobre la diversidad y manejan un rango de valores distinto. Los valores para el índice de (λ), oscilan de 0 y 1, donde 0 representa una baja diversidad y un valor próximo a 1 sugiere una alta diversidad (Salmerón *et al.*, 2017). El índice H' indica baja diversidad cuando los valores son inferiores a 2 y alta diversidad si los valores son superiores a 3 (Somarriba, 1999). Asimismo, el índice D_{Mg} denota poca diversidad cuando los valores son menores a 2, mientras que mayores a 5, indican alta diversidad (Margalef, 1972).

Tabla 1. Fórmulas utilizadas para determinar los índices de diversidad e indicadores ecológicos de las especies.
Table 1. Formulas used to determine species diversity indices and ecological indicators.

Fórmula	Donde:
$IVI = \frac{\sum_{i=1}^n (AR_i, DR_i, FR_i)}{3}$	IVI = índice de valor de importancia AR _i = abundancia relativa por especie DR _i = dominancia relativa de la especie FR _i = frecuencia relativa de la especie
$Ar = \left(\frac{n}{N}\right) \times 100$	Ar = abundancia relativa por especie n = número de individuos de la especie N = número general de todas las especies
$Dr = \left(\frac{i}{N}\right) \times 100$	Dr = dominancia relativa de la especie i = área de copa de la especie N = área de copa general de todas las especies
$Fr = \left(\frac{n}{N}\right) \times 100$	Fr = frecuencia relativa de la especie n = número de sitios en donde la especie está presente N = número total de sitios muestreados.
$D_{\square} = \frac{S - 1}{\ln N}$	D_{Mg} = diversidad de Margalef S = número de especies presentes ln = logaritmo natural N = número total de individuos
$\begin{aligned} \lambda &= \sum pi^2 \\ \text{Complemento de Simpson} \\ &= 1 - \sum pi^2 \end{aligned}$	λ = índice de Simpson pi = la abundancia conforme a la especie i
$\begin{aligned} H' &= - \sum_{i=1}^s p_i \times \ln (p_i) \\ p_{\square} &= n_i / N \end{aligned}$	H' = índice de Shannon-Wiener, Pi = abundancia proporcional de la especie S = número total de las especies ln = logaritmo natural n_i = número de individuos de la especie i N = número total de individuos

Análisis de datos

Para comprobar la existencia de diferencias estadísticas en la riqueza de especies, parámetros dasométricos, abundancia y dominancia, se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene, posteriormente se ejecutó la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de los datos. Dado que los supuestos se cumplieron, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) en todas las variables para determinar diferencias entre los tratamientos. Para la comparación entre las medias se utilizó la prueba Tukey para la riqueza, abundancia y dominancia (Einot & Gabriel, 1975). Los análisis estadísticos estuvieron basados en la diferencia estadística " $p < 0.05$ " indicando que los números mostraron diferencias estadísticas.

RESULTADOS

Composición y riqueza de especies

En total se evaluaron 301 individuos vegetales, de los cuales 227 son árboles y el 74 son de porte arbustivo. Se registraron 2 órdenes (Asparagales y Pinales), 2 familias (Asparagaceae y Pinaceae) y 3 géneros (*Agave*, *Pinus* y *Pseudotsuga*). El número de especies registradas fue de 5 (*Agave montana* Villarreal, *Pinus culminicola*, *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus strobiformis* Engelm y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). La familia más representativa fue Pinaceae con cuatro especies.

En el nivel 1 se registró el mayor número de especies (*Agave montana*, *Pinus culminicola*, *Pinus hartwegii* y *Pseudotsuga menziesii* con 71, 21, 30 y 3 individuos respectivamente). En el nivel 2 se encontraron 36 individuos de *P. culminicola*, 14 de *P. hartwegii* y 13 de *P. strobiformis*. En los niveles 3 y 4, únicamente se identificaron dos especies, específicamente *P. culminicola* (con 36 individuos en el nivel 3 y 26 en el nivel 4) y *Pinus hartwegii* (con 21 individuos en el nivel 3 y 30 en el nivel 4).

Los índices de diversidad (Simpson, Shannon – Weiner y Margalef) mostraron una baja diversidad para todo el gradiente altitudinal, desde el nivel 1 (3190 msnm) hasta el nivel 4 (3700 msnm) (Tabla 2). Sin embargo, a medida que la altitud disminuye, se aprecia un incremento gradual en los valores de diversidad. El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas entre los niveles altitudinales en los índices de Shannon – Weiner (*p* value: 0.01) y Margalef (*p* value: 0.03). La prueba de Tukey indicó que los niveles 1, 2 y 4 son estadísticamente diferentes respecto a la diversidad de especies (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de los índices de riqueza de especies por piso altitudinal.

Table 2. Values of species richness indexes by altitudinal level.

Altitud (msnm)	Índices de diversidad		
	Margalef	Simpson	Shannon
3700	0.2484 *	0.2337	0.3493 *
3500	0.2473	0.4645	0.6573
3300	0.4846 *	0.5113	0.8701 *
3190	0.6213 *	0.5788	1.0157 *

*: Diferencias estadísticas significativas.

Valores de importancia

En los 3190 msnm, las especies más abundantes fueron *A. montana* con 59% (617 individuos ha⁻¹) y *P. hartwegii* con 26% (275 individuos ha⁻¹). Además, se observó que *P. hartwegii* fue la especie que mostró mayor dominancia con 69% (5277 m²/ha), mientras que *P. menziesii* exhibió menor dominancia con 5% (452 m²/ha). Respecto a la frecuencia relativa, se observó que *A. montana*, *P. culminicola* y *P. hartwegii* mostraron el mismo valor (30%). Las especies con mayor representatividad (IVI) en esta altitud fueron *P. hartwegii* y *A. montana* con 41% y 31% respectivamente (Tabla 3).

En los 3300 msnm, se destacó *P. culminicola* con la mayor *Ar* con 57% (300 individuos ha⁻¹). Las especies más dominantes fueron *P. strobiformis* y *P. hartwegii* con 40% (2816 m²/ha) y 37% (2624 m²/ha) respectivamente. Todas las especies registradas en este rango altitudinal mostraron la misma *Fr* (33.3%). Además, el mayor peso ecológico fue de *P. culminicola* con 37% (Tabla 3).

En los 3500 msnm, el *P. culminicola* fue la especie más abundante con 63% (300 individuos ha⁻¹), mientras que el más dominante fue el *P. hartwegii*, ya que registró el mayor valor con 73% (5769 m²/ha). Ambas especies tuvieron el mismo valor de frecuencia (50%). El índice de valor de importancia para esta altitud fue superior para *P. hartwegii* (53%) (Tabla 3).

En los 3700 msnm, *P. hartwegii* fue la especie que registró los valores más altos para *Ar*, *Dr* e *IVI* con 53% (250 individuos ha⁻¹), 67% (4581 m²/ha) y 53% respectivamente. Por otra parte, *P. culminicola*, de *Ar*, *Dr* e *IVI* obtuvo 46% (216 individuos ha⁻¹), 32% (2251 m²/ha) y 46% respectivamente. Además, se presentó en todos los sitios de muestreo (*Fr*: 60%) (Tabla 3).

Los análisis estadísticos mostraron diferencias significativas entre las altitudes para la abundancia (*p* value: 0.0005) y dominancia (*p* value: 0.0002). Respecto a la abundancia, solo se identificó que la altitud 3190 es estadísticamente diferente (*p* value: 0.0001). Por otra parte, en la dominancia, se identificaron diferencias en las altitudes 3700 (*p* value: 0.003) y 3300 (*p* value: 0.0006). Se encontraron diferencias significativas entre las altitudes en las variables de abundancia y dominancia de *P. culminicola* y *P. hartwegii* (*p* value<0.05). La prueba de Tukey únicamente para la altitud 3190, reveló diferencias significativas en la abundancia (*p* value: 0.002) y dominancia (*p* value:0.047) de *P. culminicola*. En *P. hartwegii*, la altitud 3300 fue estadísticamente diferente en la abundancia (*p* value: 0.015) y dominancia (*p* value:0.011).

Tabla 3. Valores de abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia.

Table 3. Abundance, dominance, frequency and importance value index values.

Altitud (msnm)	Especie	Abundancia		Dominancia		Frecuencia		Valores de importancia	
		N ha ⁻¹	%	m ² ha	%	N/Sitio	%	IVI	%
3700	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	250.17	53.57	4581.83	67.05	2	40	160.62	53.54
	<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	216.81	46.43	2251.26	32.95	3	60	139.38	46.46
	Total	466.98	100	6833.09	100	5	100	300	100
3500	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	175.12	36.84	5769.34	73.45	3	50	160.29	53.43
	<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	300.20	63.16	2085.23	26.55	3	50	139.71	46.57
	Total	475.32	100	7854.57	100	6	100	300	100
3300	<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	300.20	57.14	1561.67	22.30	3	33.33	112.78	37.59
	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	116.75	22.22	2624.62	37.48	3	33.33	93.03	31.01
	<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.	108.41	20.63	2816.87	40.22	3	33.33	94.19	31.40
	Total	525.35	100	7003.16	100	9	100	300	100
3190	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	275.19	26.4	5277.89	69.03	3	30	125.43	41.81
	<i>Agave montana</i> Villarreal	617.08	59.2	496.94	6.50	3	30	95.70	31.90
	<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	125.08	12	1418.40	18.55	3	30	60.55	20.18
	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	25.02	2.4	452.87	5.92	1	10	18.32	6.11
	Total	1042.37	100	7646.11	100	10	100	300	100

Parámetros dasométricos

Los valores del área de copa de *P. culminicola* en función del gradiente altitudinal revelan una disminución constante, desde el nivel 4 hasta el 2, con excepción del nivel 1, donde se observa un área de copa mayor en comparación con los niveles 2, 3 y 4. Por su parte, *P. hartwegii* tuvo su punto máximo en el nivel 3 y se reduce gradualmente a medida que baja la altitud (Figura 3).

Respecto a la altura, para *P. culminicola* fue similar en los cuatro niveles altitudinales, observándose que los individuos con mayor altura se encuentran en el nivel 3. Asimismo, para *P. hartwegii* se observa una tendencia similar, donde los individuos más altos predominan en el nivel 3, mientras que los de menor altura se encuentran en el nivel 4 (Figura 3).

En relación con el diámetro, *P. culminicola* evidencia una disminución progresiva desde el nivel 4 hasta el nivel 1, siendo los individuos del nivel 4 (3700 msnm) los que presentan los diámetros más grandes (Figura 3). Por otro lado, en *P. hartwegii*, se observa una similitud en los diámetros entre los niveles 2, 3 y 4, destacándose el nivel 3 con individuos que muestran un mayor diámetro.

Los valores de área de copa, altura y diámetro de *P. culminicola* y *P. hartwegii* en cada nivel altitudinal, tuvieron homogeneidad de varianzas y una distribución normal ($p > 0.05$) respectivamente. Además, no se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los niveles altitudinales de las dos especies (*P. culminicola* *p* value; área de copa: 0.56; altura: 0.61; diámetro: 0.55) (*P. hartwegii* *p* value; área de copa: 0.79; altura: 0.16; diámetro: 0.24).

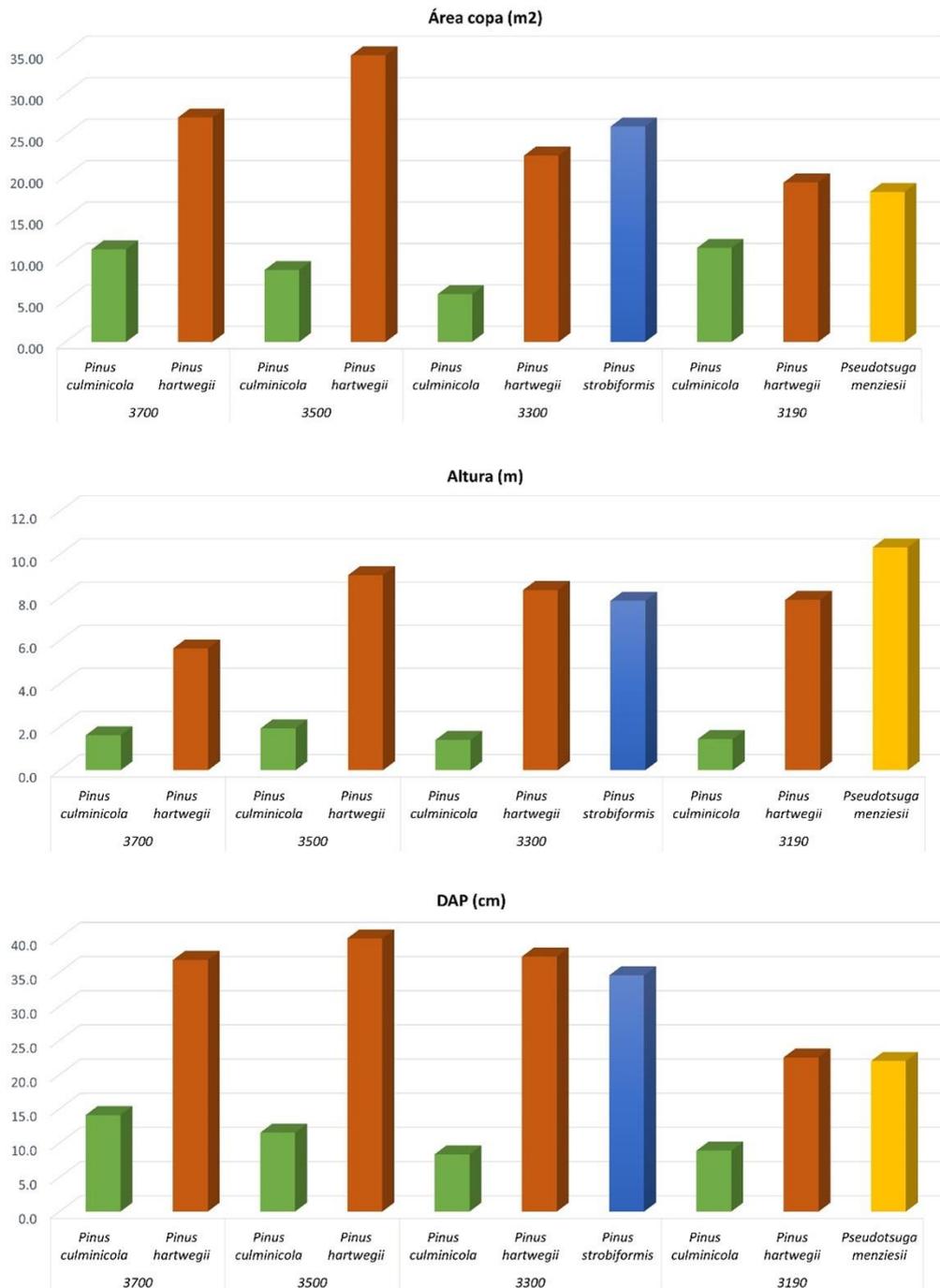


Figura 3. Área de copa, altura y DAP de las especies por gradiente altitudinal.
Figure 3. Crown area, height and DBH of the species by altitudinal gradient.

Análisis de regeneración

A lo largo del gradiente altitudinal, se observó que todas las especies tuvieron mayor densidad de árboles adultos, que de árboles jóvenes. En todas las altitudes, se observó una regeneración natural en por lo menos una especie. Particularmente, en las altitudes 3500 y 3700 *P. culminicola* y *P. hartwegii* se registraron valores de densidad de árboles nuevos. Asimismo, solo en la altitud 3300, se encontró regeneración de *P. culminicola*, mientras que sólo en los 3190 se apreció árboles jóvenes de *P. hartwegii*. Sin embargo, en todas las altitudes, el estado de regeneración se encuentra en una categoría mala (Tabla 4).

Tabla 4. Densidad de árboles adultos y jóvenes por altitud.
Table 4. Density of adult and young trees by altitude.

Altitud	Especie	Adultos (N ha ⁻¹)	Jóvenes (N ha ⁻¹)	Estado
3700	<i>Pinus culminicola</i>	200.14	16.68	M
	<i>Pinus hartwegii</i>	175.12	75.05	M
3500	<i>Pinus culminicola</i>	283.52	75.05	M
	<i>Pinus hartwegii</i>	133.42	8.34	M
3300	<i>Pinus culminicola</i>	316.88	33.36	M
	<i>Pinus hartwegii</i>	116.75	0	M
	<i>Pinus strobiformis</i>	108.41	0	M
3190	<i>Pinus culminicola</i>	125.08	0	M
	<i>Pinus hartwegii</i>	258.51	16.68	M
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	25.02	0	M

DISCUSIÓN

Composición y riqueza de especies

En este estudio la familia *Pinaceae* es el taxon más representativo en El Cerro El Potosí sobre el gradiente altitudinal evaluado. Esta información concuerda con Ramos *et al.*, (2017), quienes encontraron que, a lo largo de un gradiente de altitud en el Cerro El Potosí, la familia con más representatividad es *Pinaceae*. Coincidiendo con lo reportado con otros autores, que esta familia exhibe una amplia distribución en los bosques templados que se extienden a lo largo de las cadenas montañosas de Europa, Asia y América del norte, centro y sur (Altman *et al.*, 2020; Crofts & Brown, 2020; Graciano-Avila *et al.*, 2020; Haq *et al.*, 2021; Hernández-Salas *et al.*, 2013; Ramos *et al.*, 2017; Rundel, 2019; Sykes & Prentice, 1996). Lo anterior enfatiza en la importancia de las *Pinaceae*s en los bosques templados, ya que proveen servicios ecosistémicos fundamentales (González-Hernández *et al.*, 2023; López-Marcos, 2021). Por tanto, la conservación de las *Pinaceae*s, así como para otras especies presentes en el Cerro El Potosí, es imprescindible para la salud de este ecosistema.

El mayor número de individuos y riqueza de especies se encuentra en los 3190 msnm, mientras que conforme aumenta la altitud, estos valores disminuyen. Nuestros resultados concuerdan Salas-Morales & Williams-Linera (2019), dado que estudiaron la estructura de la vegetación y la diversidad de especies en dos gradientes de altitud en Oaxaca y Veracruz; con García-García *et al.* (2023) quienes evaluaron la riqueza de especies en un bosque templado a lo largo de un gradiente altitudinal en Guadalupe y Calvo en el estado de Chihuahua; y con Bhat *et al.* (2020), ya que analizaron la diversidad de especies en un gradiente altitudinal en el Santuario de Vida Silvestre de Kedarnath en los Himalayas, India. Estos estudios encontraron que a medida que la altitud aumenta, el número de especies e individuos descende. Esto también coincide con Ávila-Sánchez *et al.*, (2018), quienes mencionan que es frecuente encontrar una escasa diversidad y riqueza de especies en los bosques templados de pino-encino. Quizá este fenómeno pudiera deberse a la heterogeneidad ambiental, ya que este factor influye en la distribución y diversidad de las especies (Sabás-Rosales *et al.*, 2015). Esto pudiera deberse a las condiciones ambientales del sitio (contenido de fósforo y arena, capacidad de intercambio catiónico, altitud, precipitaciones), que pueden variar en función de la posición altitudinal (Ávila-Sánchez *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2020).

La riqueza de especies de Simpson (λ), Shannon-Weiner (H') y de Margalef (D_{Mg}) indican baja diversidad en todos los niveles altitudinales, lo que coincide con lo obtenido por Haga clic o pulse aquí para escribir texto. (Medrano *et al.*, 2017) quienes descubrieron que la menor diversidad de especies (H' : 1.94 y λ : 0.18) se encuentra en el mayor intervalo altitudinal evaluado (2700-3000 msnm) en la Sierra Madre Occidental en El Salto; con Gárate-Escamilla *et al.* (2023) quienes reportan valores bajos de diversidad para un bosque

templado en el municipio de Santiago en Nuevo León (α' : 0.46, H' : 0.77 y D_{Mg} : 0.74); con (González *et al.*, 2018), donde reportan baja diversidad con el índice H' y D_{Mg} en un bosque templado en el ejido la Encantada en Zaragoza, Nuevo León; y con (Caballero *et al.*, 2022) quienes encontraron baja diversidad de especies en un bosque de pino en Puebla (α' : 0.17, H' : 0.40 y D_{Mg} : 1.50). La diversidad de especies de un área puede deberse a la estructura del ecosistema analizado y a la composición de especies.

Valores de importancia

En el Cerro El Potosí se observa que los parámetros ecológicos de abundancia y dominancia se ven influenciados por el factor altitudinal, dado que se mostraron diferencias estadísticas significativas en ambos parámetros en por lo menos una altitud ($p\text{ value} < 0.05$), apreciándose una disminución del número de individuos conforme la altitud aumenta. Lo anterior coincide con lo señalado por Siles *et al.* (2017) quienes indican que la densidad de individuos se ve influenciada por la altitud, siendo diferente el número de individuos vegetales en cada determinada altitud. Por otra parte, la dominancia en los bosques templados puede verse afectada por los requerimientos de luz de las especies (Velasco *et al.*, 2023). Esto puede explicar la variación de los valores de dominancia a lo largo del gradiente de altitud del Cerro El Potosí, dado que las especies no se encuentran distribuidas de la misma manera en los diversos niveles altitudinales, donde, además, dicho efecto puede no ser lineal (Holguín-Estrada *et al.*, 2021),

Agave montana solo se presenta en los 3190 msnm, dado que se encuentra en su límite de distribución en el Cerro El Potosí, además posee la mayor abundancia en dicha altitud, lo que podría indicar una buena adaptación de dicha especie a esta elevación. Asimismo, Estrada (2011) menciona que, en el Cerro El Potosí, se ha documentado la presencia de esta especie en todas las exposiciones, extendiéndose hasta aproximadamente los 3100 msnm. Además, García (2007) indica que *A. montana* puede ser muy abundante localmente si se encuentra en óptimas condiciones para su establecimiento y desarrollo como lugares rocosos, escarpados, planicies, y señala además que, en general los agaves tienen la capacidad de crecer hasta los 3400 msnm, pero comúnmente se encuentran entre los 1000 y 2000 msnm. La alta abundancia de *A. montana* a 3190 msnm puede atribuirse a su predilección por las áreas planas y rocosas en que se encuentra en el Cerro El Potosí.

En los 3300 msnm, *Pinus strobiformis* exhibe la mayor Dominancia, sin embargo, solo se encuentra en esta altitud, mientras que *Pseudotsuga menziesii* únicamente se presenta en los 3190 msnm. Estos resultados coinciden con Ramos *et al.* (2017), dado que, en su estudio, ambas especies (*Pinus strobiformis* y *Pseudotsuga menziesii*) poseen valores bajos relacionados a la importancia ecológica en el Cerro El Potosí, en una cota altitudinal de 2800 a 3600 msnm.

En relación con *Pinus hartwegii*, dicha especie posee el mayor valor de Dr en las altitudes 3190, 3500 y 3700. Estos valores pueden deberse a que *P. hartwegii* ostenta una amplia cobertura del follaje mostrándose superior a las demás especies del Cerro El Potosí, además esta especie posee adaptación al fuego, el cual favorece su germinación, rebrote y crecimiento (Rodríguez-Trejo, 2002). Asimismo, Chávez-Aguilar *et al.* (2022) en su trabajo realizado en el bosque templado en El Nevado de Toluca en un gradiente de altitud (2800-4300 msnm), exponen que *P. hartwegii* es el taxon más dominante en todo el gradiente, coincidiendo con nuestros resultados. También, *P. hartwegii* puede tener una alta influencia en la estructura del bosque, así como un rol significativo en la captura de carbono, dado que exhibe una alta dominancia en todos los niveles altitudinales (Carrillo *et al.*, 2016; Martínez *et al.*, 2020).

Pinus culminicola presenta una amplia distribución dado que se encuentra en todos los niveles altitudinales; destaca particularmente en los 3300 msnm por su alto peso ecológico (IVT), y por su abundancia (Ar) en los 3300 y 3500 msnm. De acuerdo con Aguirre *et al.* (2003) *P. culminicola* habita diversos rodales a diferentes elevaciones del Cerro El Potosí. Asimismo, Sánchez *et al.*, (1990) indica que la presencia de *P. culminicola* está determinada por factores relacionados con la altitud, temperatura, nubosidad, la intensa exposición al sol y el escurrimiento. Asimismo, Villanueva *et al.* (2018) menciona que, tanto *P. culminicola* como *P. hartwegii* son especies sensibles a las condiciones climáticas de precipitación y

temperatura, sin embargo, la sensibilidad de *P. hartwegii* a las condiciones climáticas es menor que la de *P. culminicola*.

Parámetros dasométricos

Siles *et al.* (2017) señalan que la altitud tiene una influencia sobre el área basal y volumen de fuste. El área de copa en *Pinus culminicola* muestra una disminución desde los 3700 hasta los 3300 msnm, con excepción de los 3190 msnm, donde se aprecia un valor superior a las otras altitudes. En relación con la altura, *P. culminicola* y *Pinus hartwegii* muestran una tendencia similar, con los individuos más altos en los 3500 msnm. El diámetro de *P. culminicola* exhibe una disminución gradual a medida que se desciende en altitud, siendo los individuos de los 3700 msnm los que tienen los mayores diámetros. Velasco *et al.* (2023) en su estudio encontró que el diámetro, área basal y la altura aumentan conforme asciende la altitud, además expone que, en la mayor altitud evaluada, los rodales se encuentran en un mejor estado de conservación, indicando ser una característica de un bosque maduro. Esto podría explicar los valores de área de copa, altura y diámetro en el caso de *P. culminicola* a 3190 msnm, ya que es posible que estos árboles no se hayan visto tan afectados por incendios, lo que a su vez indicaría que son árboles de mayor edad y tamaño.

Respecto a *P. hartwegii*, se evidencia un efecto en U invertida, dado que su valor máximo se registra en los 3500 msnm y se reduce gradualmente a medida que la altitud disminuye. Los diámetros de esta especie presentan similitudes las altitudes 3300, 3500 y 3700 msnm, destacando el diámetro de los 3500 msnm. Sin embargo, los valores de esta especie podrían atribuirse a la reducción de individuos de mayores dimensiones, como resultado de la explotación forestal (Sánchez *et al.*, 1987).

Análisis de regeneración

El análisis de regeneración en el Cerro El Potosí muestra que la densidad de árboles adultos es muy superior en comparación con la densidad de árboles jóvenes. Lo cual indica que el potencial de regeneración natural del bosque en la exposición Este es malo. Flores-Rodríguez *et al.* (2022) menciona que la variable exposición (N, S, E y O) tiene influencia sobre la regeneración natural, donde según la exposición, puede ejercer un efecto positivo o negativo sobre el proceso de regeneración. Según Godínez *et al.* (2016) la exposición N, es la orientación más benévola para la regeneración natural, mientras que la exposición cenital y sur son las menos favorables. Esto se podría deber a que la exposición norte recibe menos luz solar, por tanto, es la orientación más propicia para la regeneración debido a su contenido de mayor humedad (Flores-Rodríguez *et al.*, 2022).

Pese a la mala regeneración del bosque templado del Cerro El Potosí, se aprecia presencia de árboles jóvenes (regeneración) de al menos una especie en todos los niveles altitudinales, lo que coincide con Ribeiro *et al.* (2022), quienes mencionan que lo anterior resalta la importancia de la regeneración natural, ya que es un proceso esencial y complejo que fundamentalmente actúa en la conservación y renovación de los bosques. Esta información muestra la capacidad regenerativa del bosque del Cerro El Potosí pese a los diversos sucesos de degradación que ha atravesado a lo largo del tiempo. Asimismo, Martínez-Garza *et al.* (2022) mencionan que una alta abundancia de plantas indicaría que el bosque tiene un potencial alto de regeneración, sin embargo, esta es limitada en los bosques que fueron gravemente afectados por incendios. Lo cual podría explicar la poca regeneración de las especies en el gradiente evaluado en el Cerro El Potosí.

Particularmente, en los 3500 y 3700 msnm, se registran árboles jóvenes de *Pinus hartwegii* y *Pinus culminicola*, esto podría indicar que en estas altitudes se encuentran las condiciones óptimas para la regeneración de ambas especies. En concordancia con Romahn-Hernández *et al.* (2020), quienes encontraron que en las altitudes media y alta de un bosque templado (2900-3600 msnm) la regeneración natural en coníferas es más exitosa. Pese a la reducción poblacional a causa de los disturbios antrópicos, se han visto individuos jóvenes de *P. culminicola* (Sánchez *et al.*, 1987). Cortés-Cabrera *et al.* (2018) encontraron que la densidad de plántulas (regeneración) fue mayor en los 3050 y 3225 msnm. Por otra parte, considerando que muchas de las especies de pinos son intolerantes a la sombra (Rodríguez-Trejo & Quiahua, 2021), la apertura del dosel puede influir en la regeneración, ya que crea un entorno

más propicio para dicha regeneración (García-García *et al.*, 2023). Por tanto, dicha apertura del dosel puede ser benéfica para los pinos del Cerro el Potosí. Sin embargo, para las áreas con dosel muy abierto, algunos autores recomiendan el uso de estrategias de restauración ecológica con el fin de estimular los procesos de regeneración natural del bosque (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2020; Martínez-Garza *et al.*, 2022; Ramos, 2015).

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados encontrados, a lo largo del gradiente de altitud del bosque templado del Cerro El Potosí, se observó una disminución en los valores de los parámetros de abundancia y riqueza de especies conforme la elevación aumentaba. Lo anterior confirma la hipótesis planteada en este estudio, dado que mostraron una tendencia decreciente conforme aumenta la altitud. *Pinus culminicola* y *Pinus hartwegii* son las especies de mayor valor de importancia ecológica en todo el gradiente altitudinal. Los parámetros dasométricos altura, diámetro normal y área de copa no mostraron diferencias significativas entre las altitudes.

El estado de regeneración de todas las especies analizadas (*Pinus culminicola*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pseudotsuga menziesii*) es malo en todos los niveles altitudinales.

Los resultados obtenidos de esta investigación proporcionan conocimiento actual que guarda la estructura y composición de *Pinus culminicola*, así como de *P. hartwegii*, *P. strobiformis* y *P. menziesii* a través de su distribución altitudinal en el Cerro El Potosí, este trabajo muestra además la importancia ecológica de las especies que componen este ecosistema. Esperando que esta investigación aporte datos para futuros estudios y planes de manejo y conservación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el otorgamiento de la beca de doctorado que financia la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- Adhikari, S., Baral, H., & Nitschke, C. R. (2018). Identification, prioritization and mapping of ecosystem services in the Panchase Mountain Ecological Region of Western Nepal. *Forests*, 9(9), 554. <https://doi.org/10.3390/f9090554>
- Aguirre, 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), 219–225. <http://eprints.uanl.mx/1220/>
- Alanís, E., Mora Olivo, A., & Marroquín de la Fuente, J. S. (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación* (E. Alanís Rodríguez, A. Mora Olivo, & J. S. Marroquín de la Fuente, Eds.; 1st ed.). Editorial Universitaria UANL. https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Rodriguez-65/publication/343137042_Muestreo_Ecologico_de_la_vegetacion/links/5f186f4545851515ef3e6b0f/Muestreo-Ecologico-de-la-vegetacion.pdf
- Alanís-Rodríguez, E., Sánchez-Castillo, L., Méndez-Osorio, C., Canizales Velázquez, P. A., Mora-Olivo, A., & Rubio Camacho, E. (2020). Structure and diversity of trees on post-fire regenerated areas in Sierra de Guerrero, Mexico. *Botanical Sciences*, 98(2), 210–218. <https://doi.org/10.17129/botsci.2220>
- Altman, J., Treydte, K., Pejcha, V., Cerny, T., Petrik, P., Srutek, M., Song, J.-S., Trouet, V., & Dolezal, J. (2020). Tree growth response to recent warming of two endemic species in Northeast Asia. *Climatic Change*, 162, 1345–1364. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02718-1>

- Ávila-Sánchez, P., Sánchez-González, A., Catalán-Heverástico, C., Almazán-Núñez y J. Jiménez-Hernández, R. C., & Jiménez-Hernández, J. (2018). Patrones de Riqueza y Diversidad de Especies Vegetales en un gradiente altitudinal en Guerrero, México. *Polibotánica*, 0(45), 101–113. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.8>
- Beaman, J. H., & Andresen, J. W. (1966). The Vegetation, Floristics and Phytogeography of the Summit of Cerro Potosi, Mexico. *The American Midland Naturalist*, 75(1), 1–33. <https://doi.org/10.2307/2423480>
- Bhat, J. A., Kumar, M., Negi, A. K., Todaria, N. P., Malik, Z. A., Pala, N. A., Kumar, A., & Shukla, G. (2020). Species diversity of woody vegetation along altitudinal gradient of the Western Himalayas. *Global Ecology and Conservation*, 24, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01302>
- Caballero, P., Treviño Garza, E. J., Mata Balderas, J. M., Alanís Rodríguez, E., Yerena Yamallel, J. I., & Cuéllar Rodríguez, L. G. (2022). Análisis de la estructura y diversidad de bosques templados en la ladera oriental del volcán Iztaccíhuatl, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), 76–102. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1253>
- Cadena-Zamudio, D. A., Flores-Garnica, J. G., Lomelí-Zavala, M. E., & Flores-Rodríguez, A. G. (2022). Does the severity of a forest fire modify the composition, diversity and structure of temperate forests in Jalisco? *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 28(1), 461–478. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.12.076>
- Carrillo, F., Acosta Mireles, M., Jiménez Cruz, C. del R., González Molina, L., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 681–691. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n3/2007-0934-remexca-7-03-681.pdf>
- Chávez-Aguilar, G., Campos-Ángeles, G. V., & Pérez-Suárez, M. (2022). Estructura y composición del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en su distribución altitudinal en el Nevado de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 54–76. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1257>
- CONAFOR. (2018). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de Resultados 2009-2014. In *Comisión Nacional Forestal*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD002905.pdf>
- CONAFOR. (2020). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFYS), Datos del Inventario, Principales indicadores Forestales (2015 - 2020)*. <https://snmf.cnf.gob.mx/principalesindicadoresforestalesciclo-2015-2020/>
- CONAGUA. (2015, April 20). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Navidad-Potosí-Raíces (1916), Estado de Nuevo León*. Diario Oficial de La Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103175/DR_1916.pdf
- Cortés-Cabrera, H. E., Jurado, E., Pompa-García, M., Aguirre-Calderón, O. A., Pando-Moreno, M., & González-Tagle, M. A. (2018, August). Effect of fire and elevation on the regeneration of *Pinus hartwegii* Lindl. in northeastern Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 197–205. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.09.057>
- Crofts, A. L., & Brown, C. D. (2020). The importance of biotic filtering on boreal conifer recruitment at alpine treeline. *Ecography*, 43(6), 914–929. <https://doi.org/10.1111/ecog.04899>
- Dávila-Lara, M. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jurado-Ybarra, E., Treviño-Garza, E., González-Tagle, M. A., & Trincado-Villagrán, G. F. (2019). Estructura y diversidad de especies arbóreas en bosques templados de San Luis Potosí, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18), 399–409. <https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2112>
- Egan, P. A., & Price, M. F. (2017). *Mountain Ecosystem Services and Climate Change: A Global Overview of Potential Threats and Strategies for Adaptation (UNESCO)* (P. A. Egan & M. F. Price, Eds.). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000248768>
- Einot, I., & Gabriel, K. R. (1975). A Study of the Powers of Several Methods of Multiple Comparisons. *Journal of the American Statistical Association*, 70(351), 574. <https://doi.org/10.2307/2285935>
- Estrada, E., Villarreal Quintanilla, J. Á., Salinas Rodríguez, M. M., Cantú Ayala, C. M., González Rodríguez, H., & Jiménez Pérez, J. (2014). *Coníferas de Nuevo León, México*

- (A. E. Estrada Castellón, J. Á. Villarreal Quintanilla, M. M. Salinas Rodríguez, C. M. Cantú Ayala, H. González Rodríguez, & J. Jiménez Pérez, Eds.; 1st ed.). Universidad Autónoma de Nuevo León. https://www.researchgate.net/publication/275276634_Coníferas_de_Nuevo_Leon_Mexico
- Estrada, J. R. (2011). *Cambios en composición, estructura y diversidad vegetal en diferentes gradientes de exposición y altitud en el Cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León, México* [Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Forestales, U.A.N.L.]. <https://eprints.uanl.mx/2390/1/1080224668.pdf>
- Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa Villaseñor, P., Mena-Munguía, S., Lomelí-Zavala, M. E., & Cadena-Zamudio, D. A. (2022). Variables ambientales que determinan la regeneración natural de pinos en ecosistemas alterados por incendios. *Ecología Aplicada*, 21(1), 25–33. <https://doi.org/10.21704/rea.v21i1.1872>
- Galicia, L., Chávez-Vergara, B. M., Kolb, M., Jasso-Flores, R. I., Rodríguez-Bustos, L. A., Solís, L. E., Guerra de la Cruz, V., Pérez Campuzano, E., & Villanueva, A. (2018). Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2), 01–18. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421443>
- Gárate-Escamilla, H. A., Tovar Cárdenas, A., Jurado Ybarra, E., Cotera Correa, M., Alanís Rodríguez, E., & Gutiérrez Gutiérrez, M. (2023). Diversidad y análisis germinativo de especies arbóreas y arbustivas de interés ecológico en un área incendiada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(79), 317–331. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1352>
- García, A. (2007). Los Agaves de México. *Ciencias*, 87, 14–23. <https://www.redalyc.org/pdf/644/64408704.pdf>
- García, M. A., Treviño Garza, E. J., Cantú Ayala, C. M., & González Saldívar, F. N. (1999). Zonificación ecológica del cerro “El Potosí”, Galeana, Nuevo León, México. *Investigaciones Geográficas*, 38, 31–40. <https://doi.org/10.14350/rig.59076>
- García-Arévalo, A., & González-Elizondo, S. (1991). Flora y vegetación de la cima del cerro Potosí, Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana*, 13, 53–74. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57401305>
- García-García, S. A., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J., Cuéllar-Rodríguez, L. G., & Chávez-Costa, A. C. (2023). Composición, estructura y estado de la regeneración arbórea en un gradiente altitudinal en un bosque templado de Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Polibotánica*, 0(56), 81–100. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.56.5>
- Germandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126–133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Godínez, S. M., Rodríguez, F. A., López, N. P., & Camposeco, J. (2016). Evaluación de la regeneración natural de tres especies coníferas en áreas de distribución natural en el altiplano occidental de Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 3(1), 5–16. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v3i1.119>
- González, R., Treviño-Garza, E. J., Duque-Montoya, A., González Tagle, M. A., Gómez-Cárdenas, M., & Bautista-Cruz, A. (2018). Diversidad y estructura arbórea en un bosque de *Abies vejarii* Martínez en el sur del estado de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.142>
- González-Hernández, L., Romo-Lozano, J. L., Cristóbal-Acevedo, D., Martínez Damian, M. Á., & Mohedano Caballero, L. (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos de cuatro sistemas forestales periurbanos a través de i-Tree Eco. *Madera y Bosques*, 29(3), e2932588. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2932588>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E., Mora-Olivo, A., & Corral-Rivas, J. (2020). Cambios en la composición y estructura de especies arbóreas en un bosque templado de Durango, México. *Acta Botánica Mexicana*, 127, 1–16. <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1522>
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G. F., & Hernández-García, M. A. (2007). Ecología y silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 13(1), 67–83. <https://www.redalyc.org/pdf/629/62913110.pdf>

- Haq, S. M., Calixto, E. S., Rashid, I., & Khuroo, A. A. (2021). Human-driven disturbances change the vegetation characteristics of temperate forest stands: A case study from Pir Panchal mountain range in Kashmir Himalaya. *Trees, Forests and People*, 6, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100134>
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Efecto del Manejo Forestal en la Diversidad y Composición Arbórea de un Bosque Templado del Noroeste de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(2), 189–199. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.08.052>
- Holguín-Estrada, V. A., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., Yerena-Yamallel, J. I., & Pequeño-Ledezma, M. Á. (2021). Estructura y composición florística de un bosque de galería en un gradiente altitudinal en el noroeste de México. *Madera y Bosques*, 27(2), 1–16. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722123>
- IMTA. (2013). *ERIC III Ver. 4. Extractor Rápido de Información Climatológica*. Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua. http://hidrosuperf.imta.mx/sig_eric/
- INEGI. (1986). *Síntesis geográfica del estado de Nuevo León* (1st ed.). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220747/702825220747_1.pdf
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Nuevo León 2017*. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/NL_ANUARIO_PDF.pdf
- Li, T., Xiong, Q., Luo, P., Zhang, Y., Gu, X., & Lin, B. (2020). Direct and indirect effects of environmental factors, spatial constraints, and functional traits on shaping the plant diversity of montane forests. *Ecology and Evolution*, 10(1), 557–568. <https://doi.org/10.1002/ece3.5931>
- López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Monárrez-González, J. C., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 39–51. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311518>
- López-Marcos, D. (2021). Servicios ecosistémicos de masas mixtas de pino resinero y pino albar: conservación de la biodiversidad y secuestro de carbono. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 47(1), 27–38. <https://doi.org/10.31167/csecfv5i47.19924>
- Manzanilla, U. (2017). *Pinus culminicola*: un pino mexicano raro, en peligro de extinción y único en el mundo. *Herbario CICY, Centro de Investigación Científica de Yucatán*, 9, 9–12. <https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/2433>
- Margalef, R. (1972). Homage to Evelyn Hutchinson, or why there is an upper limit to diversity. *Connecticut Academy of Arts and Sciences*, 44, 211–235. <https://digital.csic.es/handle/10261/166281>
- Martínez, J. E., Carrillo Anzures, F., Acosta Mireles, M., Romero Sánchez, M. E., & Perez-Miranda, R. (2020). Ecuaciones alométricas para estimar carbono en brinzales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(60), 144–160. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.726>
- Martínez-Garza, C., Juan-Baeza, I., León-Carvajal, K., & Hernández-Hernández, M. (2022). La regeneración del bosque después de un incendio. *Inventio*, 18(44), 1–11. <https://doi.org/10.30973/inventio/2022.18.44/9>
- Medrano, M. de J., Hernández, F. J., Corral Rivas, S., & Nájera Luna, J. A. (2017). Diversidad arbórea a diferentes niveles de altitud en la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(40), 57–68. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v8n40/2007-1132-remcf-8-40-00057.pdf>
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. El País. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACL893.pdf
- Otavo, S., & Echeverría, C. (2017). Fragmentación progresiva y pérdida de hábitat de bosques naturales en uno de los hotspot mundiales de biodiversidad. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(4), 924–935. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.041>
- Pretzsch, H. (2009). *Forest Dynamics, Growth and Yield* (Vol. 1). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>

- Ramos, J. C. (2015). *Análisis del crecimiento, composición y estructura de un bosque de coníferas: relación del fuego y variabilidad climática en el Cerro el Potosí* [Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Forestales, U.A.N.L.]. <https://eprints.uanl.mx/13931/1/1080237743.pdf>
- Ramos, J. C., Treviño Garza, E. J., Buendía Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., & López Martínez, J. I. (2017). Productividad y estructura vertical de un bosque templado con incidencia de incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(43), 64–88. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322017000500064&lng=es&tlng=es
- Ribeiro, S., Cerveira, A., Soares, P., & Fonseca, T. (2022). Natural Regeneration of Maritime Pine: A Review of the Influencing Factors and Proposals for Management. *Forests*, 13(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/f13030386>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2002). Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 7(2), 145–151. https://www.researchgate.net/profile/Dante-Rodriguez-Trejo/publication/321434002_Ecologia_del_fuego_en_el_bosque_de_Pinus_hartwegii/links/5eb20c5845851592d6bd4895/Ecologia-del-fuego-en-el-bosque-de-Pinus-hartwegii.pdf
- Rodríguez-Trejo, D. A., & Quiahua, B. (2021). *Pinus* L. (Pinaceae). In *Semillas de Especies Forestales* (1st ed., pp. 223–245). División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. <https://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/SemillasdeEspeciesForestales.pdf>
- Romahn-Hernández, L. F., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., Monterroso-Rivas, A. I., & Pérez-Hernández, M. de J. (2020). Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 8(22), 1–17. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.72751>
- Rubio, E. A., González Tagle, M. A., Jiménez Pérez, J., Alanís Rodríguez, E., & Ávila Flores, D. Y. (2014). Diversidad y distribución vertical de especies vegetales mediante el índice de Pretzsch. *Ciencia UANL*, 17(65), 34–41. <https://eprints.uanl.mx/7024/1/Diversidad-y-distribucion-vertical-de-especies.pdf>
- Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Chávez-Durán, Á. A., & Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Analysis of the structure and diameter distribution in temperate forests under the perspective of the potential fire regime. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 21(3), 281–294. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.053>
- Rundel, P. W. (2019). A Neogene Heritage: Conifer Distributions and Endemism in Mediterranean-Climatic Ecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 1–19. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00364>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1st ed.). Limusa, S.A. <https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMxPort.pdf>
- Sabás-Rosales, J. L., Sosa-Ramírez, J., & Luna-Ruiz, J. D. J. (2015). Diversidad, distribución y caracterización básica del hábitat de los encinos (*Quercus*: Fagaceae) del Estado de San Luis Potosí, México. *Botanical Sciences*, 93(4), 881–897. <https://doi.org/10.17129/botsci.205>
- Salas-Morales, S. H., & Williams-Linera, G. (2019). Patterns of vegetation along contrasting elevation gradients in Oaxaca and Veracruz, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90(0), 1–21. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.3059>
- Salmerón, A., Geada López, G., & Fagilde Espinoza, M. del C. (2017). Propuesta de un índice de diversidad funcional: Aplicación a un bosque semideciduo micrófilo de Cuba Oriental. *Bosque (Valdivia)*, 38(3), 457–466. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000300003>
- Salzer, M. W., Larson, E. R., Bunn, A. G., & Hughes, M. K. (2014). Changing climate response in near-treeline bristlecone pine with elevation and aspect. *Environmental Research Letters*, 9(11), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/114007>
- Sánchez, R., López García, J., & Espinoza, J. M. (1987). Cambios en la comunidad de *Pinus culminicola* Andresen & Beaman en el Cerro Potosí, NL México. *Investigaciones Geográficas*, 1(17), 65–73. <https://doi.org/10.14350/ig.59407>

Recibido:
27/noviembre/2023

Aceptado:
20/junio/2024

- Sánchez, R., López García, J., & Espinoza Rdz., J. M. (1990). *Pinus culminicola* Andresen y Beaman y sus asociaciones en la ladera sur del cerro La Viga, Coahuila. *Investigaciones Geográficas*, 1(21), 21–43. <https://doi.org/10.14350/ig.58989>
- Siles, P., Talavera, P., Andino Rugama, F., Alaniz, L., & Ortiz González, W. (2017). Composición florística, estructura y biomasa de los bosques de pino-encino en la reserva Santa Rosa, Tisey, Estelí, Nicaragua. *Revista de Biología Tropical*, 65(2), 763–775. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i2.22928>
- Somarriba, E. (1999). Diversidad Shannon. *Agroforestería En Las Américas*, 6(23), 72–74. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6079?locale-attribute=fr>
- Speziale, K. L. (2012). *Composición y diversidad de la flora de afloramientos rocosos del norte de la Patagonia y su relación con factores ambientales a distintas escalas* [Tesis de Doctorado, Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue]. <http://rdi.uncoma.edu.ar/bitstream/handle/uncoma/177/Speziale-Tesis%20doctoral.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sykes, Martin T., & Prentice, I. C. (1996). Climate change, tree species distributions and forest dynamics: A case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of northern Europe. *Climatic Change*, 34(2), 161–177. <https://doi.org/10.1007/BF00224628>
- Velasco, M. U., Velázquez Martínez, A., Hernández de la Rosa, P., Fierros González, A. M., & Vera Castillo, J. A. G. (2023). Caracterización de un bosque templado en un gradiente altitudinal en Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 29(1), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912465>
- Villanueva, J., Vázquez Selem, L., Estrada Ávalos, J., Martínez Sifuentes, A. R., Cerano Paredes, J., Canizales Velázquez, P. A., Franco Ramos, O., & Reyes Camarillo, F. del R. (2018). Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49), 165–186. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.128>
- Zhang, H., Cai, Q., & Liu, Y. (2022). Altitudinal difference of growth-climate response models in the north subtropical forests of China. *Dendrochronologia*, 72, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125935>