

COMPOSICIÓN, ESTRUCTURA Y ESTADO DE LA REGENERACIÓN ARBÓREA EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN UN BOSQUE TEMPLADO DE GUADALUPE Y CALVO, CHIHUAHUA

COMPOSITION, STRUCTURE AND STATUS OF TREE REGENERATION IN AN ALTITUDINAL GRADIENT IN A TEMPERATE FOREST OF GUADALUPE Y CALVO, CHIHUAHUA

García-García, Samuel Alberto; Eduardo Alanís-Rodríguez; Óscar Alberto Aguirre Calderón; Eduardo Javier Treviño-Garza; Luis Gerardo Cuéllar-Rodríguez y Alejandro Collantes Chávez-Costa

COMPOSICIÓN, ESTRUCTURA Y ESTADO DE LA REGENERACIÓN ARBÓREA EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN UN BOSQUE TEMPLADO DE GUADALUPE Y CALVO, CHIHUAHUA

COMPOSITION, STRUCTURE AND STATUS OF TREE REGENERATION IN AN ALTITUDINAL GRADIENT IN A TEMPERATE FOREST OF GUADALUPE Y CALVO, CHIHUAHUA



Composición, estructura y estado de la regeneración arbórea en un gradiente altitudinal en un bosque templado de Guadalupe y Calvo, Chihuahua

Composition, structure and status of tree regeneration in an altitudinal gradient in a temperate forest of Guadalupe y Calvo, Chihuahua

García-García, Samuel Alberto; Eduardo Alanís-Rodríguez; Óscar Alberto Aguirre Calderón; Eduardo Javier Treviño-Garza; Luis Gerardo Cuéllar-Rodríguez y Alejandro Collantes Chávez-Costa

COMPOSICIÓN,
ESTRUCTURA Y ESTADO
DE LA REGENERACIÓN
ARBÓREA EN UN
GRADIENTE ALTITUDINAL
EN UN BOSQUE
TEMPLADO DE
GUADALUPE Y CALVO,
CHIHUAHUA

COMPOSITION,
STRUCTURE AND STATUS
OF TREE REGENERATION
IN AN ALTITUDINAL
GRADIENT IN A
TEMPERATE FOREST OF
GUADALUPE Y CALVO,
CHIHUAHUA

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 56: 81-100. Julio 2023

DOI:
10.18387/polibotanica.56.5

Samuel Alberto García-García
Eduardo Alanís-Rodríguez / eduardo.alanisrd@uanl.edu.mx
Óscar Alberto Aguirre-Calderón
Eduardo Javier Treviño-Garza
Luis Gerardo Cuéllar-Rodríguez

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Carretera Nacional Km 145, CP 67700, Linares, Nuevo León, México.

Alejandro Collantes Chávez-Costa
Campus Chetumal Bahía Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort Col. Del Bosque. CP 77019 Chetumal, Quintana Roo, México.

RESUMEN: El estudio de la vegetación en gradientes altitudinales permite comprender los efectos de los cambios ambientales en esta y orientar acciones de conservación y adaptación de las especies. El objetivo del estudio fue caracterizar la estructura horizontal y vertical, conocer la composición, riqueza, diversidad, el estado de regeneración arbórea y su relación con factores abióticos en un gradiente altitudinal (piso 1: 2200 – 2600 m, piso 2: 2600 – 2800 m y piso 3: 2800 – 3200 m) de bosque templado en Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México. Se establecieron 37 parcelas de muestreo circulares de 1000 m² en seis rodales, y dentro de estas dos parcelas rectangulares de 25 m² para evaluar la regeneración. La riqueza se estimó con el índice de Margalef (D_{Mg}), la diversidad con el índice de Shannon-Weiner (H') y de diversidad verdadera (D'), y la similitud con el modelo de ordenación de Bray-Curtis. La estructura horizontal se evaluó con el Índice de Valor de Importancia (IVI), la estructura vertical con el Índice de Pretzsch (A) y la regeneración con la densidad ($N\ ha^{-1}$). Se registraron 1,466 árboles de 16 especies, nueve géneros y seis familias; Pinaceae y Fagaceae fueron las de mayor presencia. El piso 3 fue el más diverso (D) y se encontró mayor similitud en composición entre los pisos 2 y 3. El IVI mostró que en el piso 1 las especies más típicas son *Quercus sideroxylla* (19.45%) y *Pinus engelmannii* (13.18%), los pisos 2 y 3 fueron *Pseudotsuga menziesii* (28.95 % y 22.06%) y *Abies durangensis* (27.20% y 45.56%). Los pisos 1 y 2 estuvieron dominados en altura por *Pseudotsuga menziesii*, mientras que el piso 3 por *Abies durangensis*. El índice A evidenció un declive de la diversidad estructural vertical al aumentar la altitud. Se observó buena regeneración de la mayoría de las especies en el piso 1 (92.86%), piso 2 (63.64%) y piso 3 (66.67%). Dentro de las principales conclusiones el gradiente altitudinal mostró similitud en la composición de especies, densidad y área basal debido a la dominancia de familias como Pinaceae y Fagaceae, también la diversidad estructural vertical de los pisos evaluados descendió con el aumento de la altitud y finalmente, de los factores abióticos tomados en cuenta el de mayor influencia en el establecimiento de regeneración fue la apertura de dosel.

Palabras clave: Riqueza; diversidad; Mohinora; *Abies*; *Pseudotsuga*; Pretzsch.

ABSTRACT: The study of vegetation along altitudinal gradients allows understanding the effects of environmental changes and guiding conservation and adaptation actions for species. The objective was to characterize the horizontal and vertical structure, assess composition, richness, diversity, tree regeneration status, and its relationship

with abiotic factors in an altitudinal gradient (floor 1: 2200-2600 m, floor 2: 2600-2800 m, and floor 3: 2800-3200 m) of temperate forest in Guadalupe y Calvo, Chihuahua, Mexico. Thirty-seven circular sampling sites of 1000 m² were established within six stands, with two rectangular plots of 25 m² for regeneration assessment. Richness was estimated using the Margalef index (D_{Mg}), diversity with the Shannon-Weiner index (H') and true diversity (D'), and similarity with the Bray-Curtis ordination model. Horizontal structure was evaluated with the Importance Value Index (IVI), vertical structure with the Pretzsch Index (A), and regeneration with density ($N\ ha^{-1}$). A total of 1,466 trees from 16 species, nine genera, and six families were recorded, with Pinaceae and Fagaceae being the most prevalent. Floor 3 showed the highest diversity (D), and greater compositional similarity was found between floors 2 and 3. IVI revealed that in floor 1, *Quercus sideroxyla* (19.45%) and *Pinus engelmannii* (13.18%) were the most typical species, while in floors 2 and 3, *Pseudotsuga menziesii* (28.95% and 22.06%) and *Abies durangensis* (27.20% and 45.56%) dominated, respectively. Floors 1 and 2 were dominated in height by *Pseudotsuga menziesii*, while floor 3 by *Abies durangensis*. The A index showed a decline in vertical structural diversity with increasing altitude. Good regeneration was observed for most species in floor 1 (92.86%), floor 2 (63.64%), and floor 3 (66.67%). In conclusion, the altitudinal gradient showed similarity in species composition, density, and basal area due to the dominance of families such as Pinaceae and Fagaceae. The vertical structural diversity of the evaluated floors decreased with increasing altitude, and among the considered abiotic factors, canopy openness had the greatest influence on regeneration establishment.

Key words: *Abies*; Diversity; Mohinora; Pretzsch; *Pseudotsuga*; Richness.

INTRODUCCIÓN

México posee 137.8 millones de hectáreas de superficie forestal, lo que representa el 70.5% de las 195.6 millones de hectáreas del territorio nacional, de las cuales 34.2 millones de hectáreas pertenecen a bosques templados, en esta superficie hábitat de 4563 especies, de las cuales 237 se encuentran en alguna categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010, y proveen diversos servicios ecosistémicos como la recarga de mantos acuíferos, disminución de la erosión, capturan carbono y hábitat de diversas especies de flora y fauna (CONABIO, 2018; CONAFOR, 2014).

La estructura y composición de los bosques son fundamentales para el manejo forestal y la conservación de la biodiversidad (Aguirre *et al.*, 2003; Aguirre-Calderón, 2015). El análisis de los cambios en la vegetación en gradientes altitudinales permite comprender la distribución de especies en diferentes condiciones ambientales y su influencia en las interacciones biológicas (Mateo *et al.*, 2011; van der Putten *et al.*, 2016). Aunque se han realizado estudios sobre la estructura, composición, riqueza y diversidad en bosques de varios estados de México (García-García *et al.*, 2021; Manzanilla *et al.*, 2020; Silva-García *et al.*, 2021) existen escasas investigaciones en la última década que evalúen los parámetros antes señalados a lo largo de un gradiente altitudinal en este tipo de bosques (Holguín-Estrada *et al.*, 2021a; Martínez-Calderón *et al.*, 2021).

El Área de Protección de Flora y Fauna "Cerro Mohinora" es la montaña más alta de Chihuahua y fue establecida mediante decreto en 2015 como Área de Protección de Flora y Fauna (ÁPFF). Con un rango altitudinal de 2,100 a 3,307 msnm, alberga una diversidad de ecosistemas y desempeña un papel ecológico crucial al recibir abundantes precipitaciones pluviales. Además, es vital para la región hidrológica 10-Sinaloa y abastece de agua potable a la localidad de Guadalupe y Calvo. En el área se encuentran bosques de coníferas en estado prístino, teniendo asociaciones de *Abies - Picea*, *Abies - Pseudotsuga*, *Pinus - Quercus* y *Quercus - Pinus*, los cuales brindan hábitat a una amplia variedad de especies, algunas de ellas endémicas o en riesgo (CONANP, 2017).

El objetivo fue caracterizar la estructura horizontal y vertical, conocer la composición, riqueza, diversidad, el estado de regeneración natural y su relación con factores abióticos en un gradiente altitudinal (2200 m - 3200 m) de bosque templado en el ÁPF Cerro Mohinora, Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México. La determinación y comparación de estos parámetros a través del gradiente altitudinal ayuda a entender mejor cómo funcionan los ecosistemas forestales, cómo responden a los cambios ambientales y cómo podemos manejarlos de manera efectiva para garantizar su conservación y sostenibilidad a través de la toma de decisiones en la gestión de los recursos forestales y el diseño de políticas que promuevan la conservación del Área Natural Protegida Cerro Mohinora.

MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en un gradiente altitudinal (2200 – 3200 m) con exposición Norte, en tres pisos de altura (piso 1: 2200 – 2600 m, piso 2: 2600 – 2800 m y piso 3: 2800 – 3200 m) en Guadalupe y Calvo, Chihuahua, particularmente en el ÁPF Cerro Mohinora, entre las coordenadas 25° 40' 48" a 26° 13' 12" latitud Norte y 106° 31' 48" a 107° 06' 00" longitud Oeste (Arriaga *et al.*, 2000). El área se encuentra en la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, en la subprovincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses (Arriaga *et al.*, 2000; CONANP, 2017).

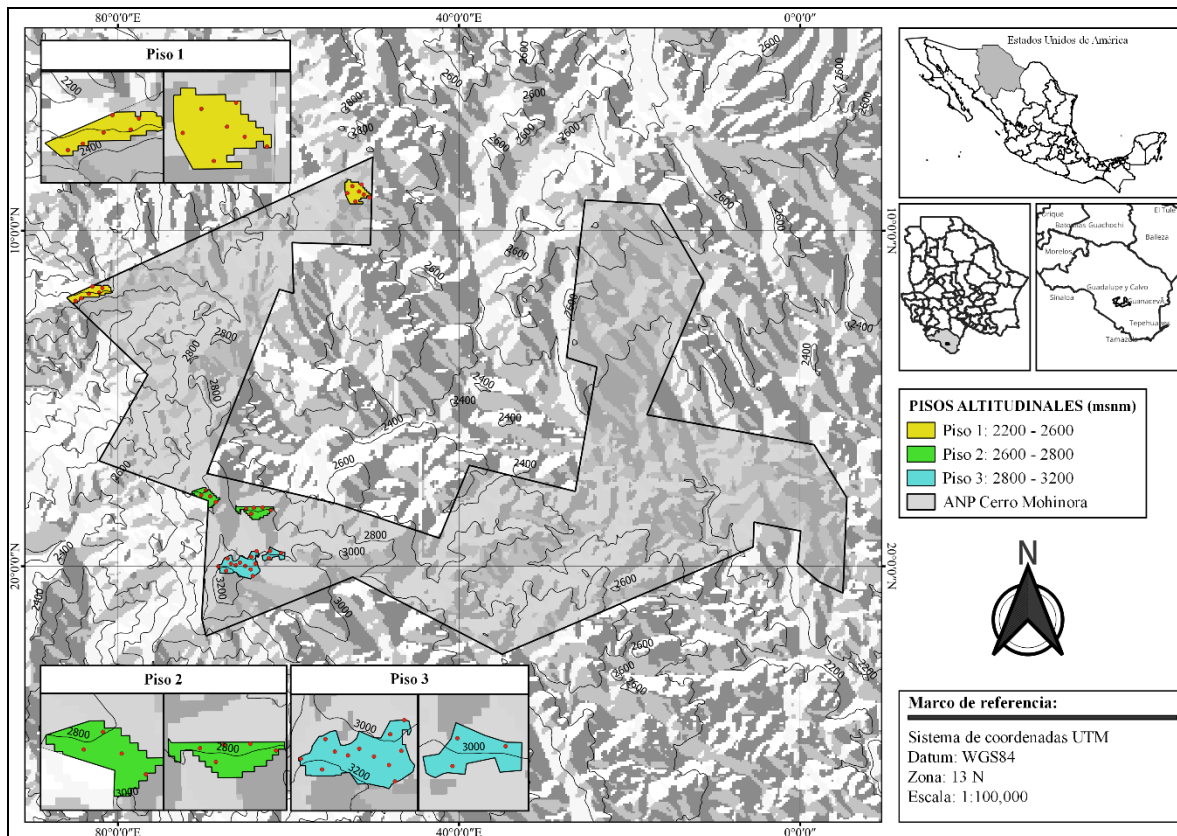


Fig. 1. Ubicación del área de estudio y distribución de sitios de muestreo dentro de la APFF Cerro Mohinora, Chihuahua.

Levantamiento de datos

Se establecieron de manera aleatoria 37 parcelas circulares de muestreo de 1000 m² cada una, distribuidas en seis rodales (dos en cada piso altitudinal, para contener los diferentes tipos de vegetación) con una intensidad de muestreo del 2%, todas con orientación norte; dentro de cada parcela, se ubicaron dos subparcelas de 25 m² (5 x 5 m) para el registro de la regeneración, es decir, 74 subparcelas o subsitios.

En cada parcela principal se registró información dasométrica del estrato arbóreo, de individuos con un diámetro normal ($d_{1.30\text{ m}} \geq 7.5$ cm, para la regeneración se consideraron aquellos con diámetro normal ($d_{1.30\text{ m}} \leq 7.5$ cm, de acuerdo con la metodología del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (Conafor, 2012). Las variables registradas del arbolado adulto fueron altura total (h, m), diámetro normal (DN, $d_{1.30\text{ m}}$, cm), la altura se estimó con un clinómetro Suunto Pm-5, y el DN con una forcípula Haglof "Mantax Blue" de aluminio. Para la regeneración se registró la especie y se contabilizó el total de individuos de cada subparcela conjuntando los datos de las dos subparcelas y posteriormente extrapolarlos a individuos por hectárea (N ha⁻¹).

Además, se registraron la elevación (m), pendiente (%) y apertura del dosel. La elevación se midió con un geoposicionador Garmin eTrex 10 y la pendiente con un clinómetro Suunto Pm-5. Para determinar la apertura de dosel (%) se usó un densiómetro cóncavo colocado en el centro de cada sitio y promediando cuatro mediciones por sitio, una a cada punto cardinal (Jadán et al., 2016).

Análisis de la información

La riqueza se estimó con el índice de Margalef (D_{Mg}), mientras que la diversidad de los pisos altitudinales se evaluó utilizando el índice de Shannon-Wiener (H') (Magurran, 2021), y el índice de diversidad verdadera (D) el cual permite comparar de una mejor manera la riqueza de especies, ya que tiene en cuenta la abundancia relativa de cada especie en la comunidad y puede proporcionar una medida más precisa de la diversidad (Jost, 2006). Para evaluar la similitud florística se generó un modelo de ordenación de Bray-Curtis, el cual se basa en un algoritmo que permite analizar la similitud de las muestras mediante el cálculo del porcentaje de similitud (0% - 100%) (Beals, 1984) (Tabla 2).

La estructura horizontal fue evaluada a través de la distribución diamétrica por piso altitudinal, así como la abundancia (N ha⁻¹), dominancia en área basal (m² ha) y su frecuencia (presencia en cada sitio). A partir de esto se calculó el Índice de Valor de Importancia (IVI), el cual adquiere valores en una escala del 0 al 10 % (Alanís et al., 2020) (Tabla 2).

La diversidad estructural vertical de los bosques se determinó con el Índice de Pretzsch (A), dicho índice divide la estructura vertical en tres estratos. El estrato I (alto), que representa al intervalo de 80-100%, en el que el árbol más alto constituye el 100%; a partir de este individuo, se clasifican los siguientes estratos: el II (medio), que se refiere al intervalo de 50-80% y el III (bajo), de 0-50% (Aguirre, 2002; Pretzsch, 2009) (Tabla 2). Para una correcta interpretación se calcula $A_{máx}$ que corresponde al valor máximo por cada una de las especies en cada estrato; este valor se logra cuando la totalidad de las especies ocurren en la misma proporción, tanto en el rodal como en los diferentes estratos (Corral et al., 2005). Se generó un gráfico utilizando TreeGrOSS: ForestSimulation (Sprauer et al., 2019); que visualiza la composición de especies por piso altitudinal y muestra los tres estratos de altura de los árboles, así como los valores determinados en el índice A . Esta simulación incluyó el número total de individuos por especie (N ha) y altura distribuyéndolos de forma aleatoria en una parcela de una hectárea.

Tabla 2. Fórmulas manejadas para determinar la estructura horizontal, vertical, riqueza y diversidad.

Fórmula	Variables
$D_{MG} = \frac{S-1}{\ln(N)}$	D_{MG} = Índice de Margalef S = Número de especies N = Número total de individuos
$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \times \ln(p_i)$ $p_i = n_i/N$	H' = Índice de Shannon-Wiener S = Número de especies P_i = Proporción de individuos de la especie i
$D = \exp(H') = \exp \left[- \left(\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \right) \right]$	D = Índice de diversidad verdadera p_i = Abundancia relativa de la i -ésima especie S = Número de especies
$IVI = \frac{\sum_{i=1}^n (AR_i, DR_i, FR_i)}{3}$	IVI = Índice de Valor de Importancia AR_i = Abundancia relativa por especie respecto a la abundancia total DR_i = Dominancia relativa de la especie i respecto a la dominancia total FR_i = Frecuencia relativa de la especie i respecto a la frecuencia total
$A = \sum_{i=1}^S \cdot \sum_{j=1}^Z p_{ij} * \ln p_{ij}$ $A_{max} = \ln(S * Z)$ $A_{rel} = \frac{A}{\ln(S * Z) * 100}$	A = Valor A de Pretzsch S = Número de especies presentes Z = Número de estratos de altura P_{ij} = Porcentaje de especies en cada zona $P_{ij} = n_{ij}/N$ $N_{i,j}$ = Número individuos de la misma especie (i) en la zona (j) N = Número total de individuos

Se verifico la normalidad de los datos a través de la prueba de Shapiro-Wilk (da Cunha *et al.*, 2009), de la riqueza (D_{MG}) y diversidad (H' y D), posteriormente se compararon estos atributos de los árboles entre pisos altitudinales para identificar diferencias estadísticamente significativas mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95%.

El análisis de la regeneración se realizó de acuerdo con Chauhan *et al.* (2008), quienes consideran una buena regeneración si; densidad de regeneración > densidad de los árboles adultos, regeneración regular si; densidad de regeneración \leq densidad de los árboles adultos y regeneración mala si; densidad de regeneración < densidad de los árboles adultos. También, se verifico la normalidad de los datos a mediante la prueba de Shapiro-Wilk (da Cunha *et al.*, 2009), y se compararon las densidades con la prueba U de Mann-Whitney (Mann y Whitney, 1947) para comparar las medianas de dos grupos independientes cuando los datos no siguen una distribución normal.

Se evaluó el cumplimiento de los supuestos de normalidad de los datos de densidad de regeneración, y así como los de pendiente ($^{\circ}$), altitud (m) y apertura de dosel (%), con la prueba

de Shapiro-Wilk (da Cunha *et al.*, 2009). Posteriormente, se determinó la influencia de las variables del sitio sobre la densidad de regeneración, y se realizó un análisis de correlación de Pearson. Todos los análisis estadísticos se plantearon a un nivel de significancia de 95% y se llevaron a cabo en el entorno de desarrollo integrado (IDE) R Studio (R Core Team, 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición, riqueza y diversidad de especies

A lo largo del gradiente se registró un promedio de 488 árboles representados en 16 especies arbóreas, nueve géneros y seis familias. Pinaceae fue la familia más rica con siete especies (41.18%), seguida de Fagaceae con cinco especies (29.41%), Ericaceae con dos especies (11.76%), y Cupressaceae, Salicaceae y Betulaceae con solamente una especie cada una (5.88%). Pinaceae y Fagaceae se han reportado en diversos bosques templados del país, estas familias contienen a los géneros *Pinus* y *Quercus* los cuales son típicos de la zona templada subhúmeda de México y en estos se basa la industria forestal (Dávila-Lara *et al.*, 2019; Graciano-Ávila *et al.*, 2020; Rzedowski, 1978; Sáenz-Romero *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2021).

Se encontraron un número de familias y géneros similar en los tres pisos altitudinales, la diferencia se notó en la cantidad de especies encontradas y en la densidad de estas, ya que en el piso 1 fue superior (15) a los demás (Tabla 3). Los datos de composición se han presentado de forma similar en otros bosques templados del país (Dávila-Lara *et al.*, 2019; Graciano-Ávila *et al.*, 2020).

La riqueza de especies presente en el gradiente se ha constatado en otros bosques del país, Silva-González *et al.* (2021) reportan una riqueza menor (año 2008 = 1.252 y año 2013 = 1.205) de acuerdo con el índice de Margalef (D_{Mg}) a los pisos altitudinales 1 y 2 pero muy similar al piso 3 en bosques del estado de Durango. Por otro lado, Rascón-Solano *et al.* (2022) en bosques templados de Guachochi, Chihuahua menciona un valor intermedio ($D_{Mg} = 1.75$) comparado con los pisos 1 y 2 del presente estudio y mayor al piso 3.

El indicador de la diversidad (D') indica que el piso 1 es más diverso que sus sucesores, existiendo una diferencia en diversidad de 1.68 veces contra el piso 2 y de 2.20 veces con el piso 3 (Tabla 3). De acuerdo con el índice de Shannon (H') la diversidad es similar para los primeros dos pisos con lo documentado por Dávila-Lara *et al.* (2019) (1.91 y 1.51) en bosques templados de San Luis Potosí.

Los resultados de normalidad indicaron que los datos de riqueza (D_{Mg} : $W = 0.97765$; p-value = 0.6500) y diversidad (H' : $W = 0.96079$; p-value = 0.214) (D' : $W = 0.97792$; p-value = 0.6593) son normales. El análisis de varianza (ANOVA) reveló que no hay diferencias significativas en la riqueza (D_{Mg} : $F = 3.136$; $Pr(>F) = 0.0563$) y diversidad (H' : $F = 0.946$; $Pr(>F) = 0.398$) (D' : $F = 1.224$; $Pr(>F) = 0.307$) de especies entre los diferentes pisos altitudinales. A pesar de ello, se observa una disminución en la riqueza y diversidad de especies a medida que se asciende en altitud, lo que concuerda con "La regla de Rapoport" (Rapoport, 1975). Según esta regla, existe una relación directa entre la altitud y la riqueza de especies, disminuyendo a medida que la altitud aumenta. Esta disminución puede ser atribuida a diversos factores como la redistribución espacial de la radiación solar, el agua, los nutrientes, la temperatura, la humedad, las horas de iluminación, el viento, la duración estacional, el tipo de suelo y la condición geológica (Malizia *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2017). Atalay (2006) menciona que estos cambios se atribuyen a diferentes condiciones climáticas entre las partes bajas y altas de las montañas, ya que, con el incremento de la altitud; la temperatura, la humedad y la presión del aire disminuyen y la radiación solar es más intensa.

A pesar de que la riqueza y diversidad de especies en los bosques templados es baja, en México se presenta una alta riqueza, ya que se distribuyen 47 especies de *Pinus* y 161 de *Quercus*, de

las cuales 26 y 109 respectivamente, son endémicas, lo que hace a México el mayor centro de riqueza y evolución en el continente en el caso de los encinos (Arizaga *et al.*, 2009; Pérez, 1998).

Tabla 3. Número de familias, géneros, especies, densidad ($N\ ha^{-1}$), área basal ($m^2\ ha^{-1}$), riqueza (D_{Mg}), diversidad (H') y diversidad verdadera (D') de los tres pisos altitudinales evaluados.

Atributos	Altitud (m)			General (Σ)
	2200 - 2600	2600 - 2800	2800 - 3200	
No. Familias	5	5	4	6
No. Géneros	7	7	7	9
No. Especies	15	11	9	16
Riqueza (D_{Mg})	2.00	1.68	1.20	
Diversidad (H')	2.19	1.67	1.40	
Diversidad verdadera (D')	8.94	5.31	4.06	

Similitud en la composición de especies

Basado en los valores de similitud de Bray-Curtis la mayor similitud se encuentra entre los pisos 2 y 3, con un valor de similitud de 58.38%. Esta similitud indica una mayor coincidencia en la composición de especies. Entre los pisos 1 y el piso 2, así como 1 y 3 indican una similitud de 21.03% y 14.17% respectivamente lo cual muestra una similitud baja en la composición de especies entre estos pisos. González *et al.*, (2018) encontraron una similitud semejante (44%) en un bosque de *Abies vejari* en Nuevo León. De igual manera Holguín-Estrada *et al.* (2021b) reportaron una similitud de alrededor del 50% para los dos pisos altitudinales más elevados.

Índice de Valor de Importancia (IVI)

En el piso 1 las especies más representativas fueron *Quercus sideroxyla* Bonpl. (IVI = 19.45%), *Pinus engelmannii* Carr. (IVI=13.18%), *Pinus arizonica* Engelm. (12.35%), mientras que once de las 14 especies reflejaron un IVI menor al 10%; dicha composición evidencia un bosque de *Quercus - Pinus*, lo cual coincide con lo reportado por otros autores para bosques templados de la Sierra Madre Occidental (SMO) (Graciano-Ávila *et al.*, 2017; Luna *et al.*, 2020) quienes mencionan a especies de *Quercus* y *Pinus* como las más importantes ecológicamente.

En el piso 2 las especies de mayor peso ecológico fueron *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Abies durangensis* Martínez. y *Pinus ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schldl. con 28.95%, 27.20% y 13.64%, respectivamente, logrando así más del 50%; 11 de las 14 especies tuvieron un IVI menor a 10%. Estos resultados indican que el bosque evaluado es un bosque de oyamel como lo mencionado por García-García *et al.* (2021) en un área cercana a la evaluada, donde dichas especies también tuvieron una importancia alta.

Las especies con valores mayores de IVI en el piso 3, fueron *Abies durangensis* 45.56%, *Pseudotsuga menziesii* con 22.06% y *Picea mexicana* Martínez. con 10.63%; seis de las nueve especies reflejaron un IVI menor al 10%; dichos valores dan lugar a un bosque de *Abies - Pseudotsuga*; la dominancia de estos géneros se ha presentado en diversos trabajos realizados en México (Buendía-Rodríguez *et al.*, 2019; Encina-Domínguez, 2015).

Tabla 4. Densidad (N ha⁻¹), dominancia (m² ha), frecuencia (%) e Índice de Valor de Importancia de cada una de las especies evaluadas los tres tipos de bosque bajo estudio.

PA	Especie	AR	AR	DR	DR	FR	FR	IVI
		(N ha ⁻¹)	(%)	(m ² ha)	(%)	Abs	(%)	(%)
	<i>Quercus sideroxyla</i> Bonpl.	169	31	2.83	12	8	6.15	19.45
	<i>Pinus engelmannii</i> Carr.	75	14	3.52	15	6	4.62	13.18
	<i>Pinus arizonica</i> Engelm.	77	14	3.14	13	5	3.85	12.35
	<i>Alnus acuminata</i> Kunth.	39	7	1.57	7	6	4.62	7.29
	<i>Quercus fulva</i> Liebm.	35	7	1.54	7	6	4.62	6.96
	<i>Quercus rugosa</i> Née.	29	5	1.85	8	5	3.85	6.72
	<i>Pinus durangensis</i> Martínez.	14	3	2.08	9	7	5.38	6.59
	<i>Pinus ayacahuite</i> C. Ehrenb. ex Schltldl.	18	3	1.03	4	8	6.15	5.43
	<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	19	4	1.18	5	6	4.62	5.18
	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	6	1	2.76	12	1	0.77	5.35
	<i>Quercus crassifolia</i> Humb. & Bonpl.	25	5	0.73	3	2	1.54	3.61
	<i>Abies durangensis</i> Martínez	16	3	0.66	3	3	2.31	3.17
	<i>Arbutus arizonica</i> Sarg. (A.Gray).	9	2	0.30	1	4	3.08	2.38
	<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	8	1	0.34	1	4	3.08	2.33
1	Subtotal	539	100.00	23.53	100.00	71.00	54.62	100.00
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	109	26	8.86	39	9	23	28.95
	<i>Abies durangensis</i>	162	38	5.93	26	7	18	27.20
	<i>Pinus ayacahuite</i>	59	14	2.76	12	6	15	13.64
	<i>Pinus durangensis</i>	23	5	2.94	13	4	10	9.45
	<i>Pinus arizonica</i>	33	8	1.68	7	3	8	7.57
2	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	22	5	0.24	1	3	8	4.59
	<i>Juniperus deppeana</i>	8	2	0.07	0	3	8	3.21
	<i>Arbutus xalapensis</i>	4	1	0.09	0	2	5	2.15
	<i>Quercus fulva</i>	1	0	0.17	1	1	3	1.17
	<i>Quercus rugosa</i>	1	0	0.13	1	1	3	1.10
	<i>Quercus sideroxyla</i>	1	0	0.03	0	1	3	0.97
	Subtotal	424	100.00	22.91	100.00	40.00	100.00	100.00
	<i>Abies durangensis</i>	268	53	14.25	47	14	9.33	45.56
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	104	21	6.79	23	15	10.00	22.06
	<i>Picea mexicana</i> Martínez.	47	9	2.92	10	10	6.67	10.63
	<i>Populus tremuloides</i>	30	6	3.08	10	5	3.33	8.10
3	<i>Pinus arizonica</i>	27	5	1.29	4	5	3.33	5.41
	<i>Pinus ayacahuite</i>	19	4	0.53	2	9	6.00	4.75
	<i>Pinus durangensis</i>	5	1	0.81	3	3	2.00	2.32
	<i>Quercus sideroxyla</i>	1	0	0.29	1	1	0.67	0.79
	<i>Juniperus deppeana</i>	1	0	0.04	0	1	0.67	0.38
	Subtotal	502	100.00	30.01	100.00	63.00	42.00	100.00
	Total	1466		76.44		174.00		

*PA = Piso altitudinal, AR = Densidad, DR = Área basal, FR = Frecuencia, Abs = Absoluta, IVI = Índice Valor de Importancia

Distribución diamétrica por piso altitudinal

La distribución de densidad - diámetro para los tres pisos mostró una disminución hacia clases diamétricas mayores, observándose que la mayor cantidad de individuos por hectárea se registró en las clases de 10 y 15 cm y que hay árboles de hasta 135 cm de DN (Fig. 2). Dicha distribución en forma de “J” invertida o curva de Liocurt se ha presentado en bosques templados de México (Cortés-Pérez *et al.*, 2021; Hernández-Moreno *et al.*, 2020; Hernández *et al.*, 2019), indicando con esto la existencia de regeneración natural dentro de los tres pisos altitudinales evaluados, en el área evaluada esto puede corresponder a la existencia de árboles de grandes dimensiones muertos y da paso al desarrollo de árboles más pequeños e intolerantes a la sombra en este caso.

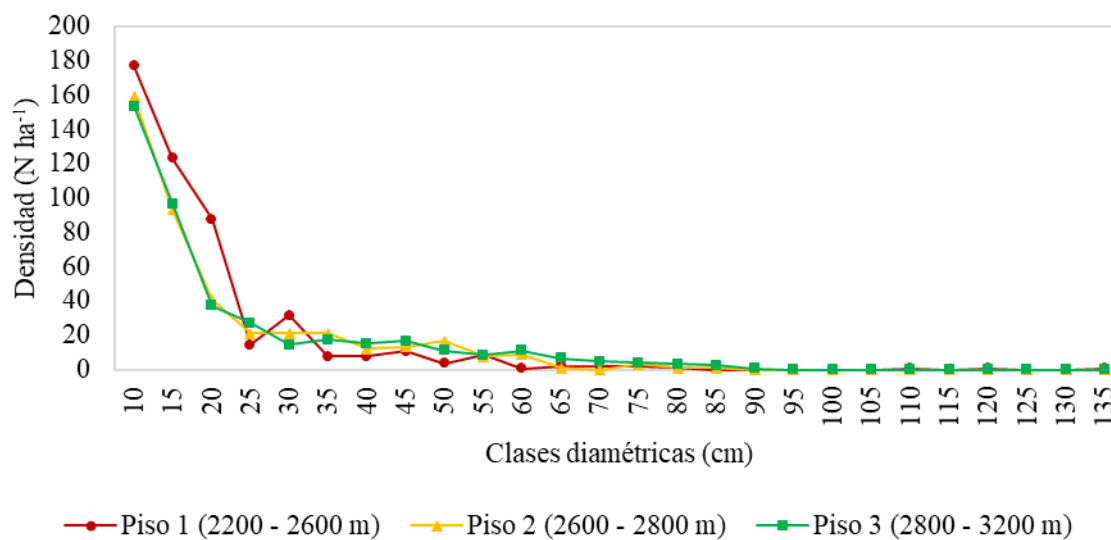


Fig. 2. Densidad de especies arbóreas por clase diamétrica y altitud.

Índice de Pretzsch (A)

Se observa una disminución en el número de árboles por hectárea conforme aumenta su talla en altura (Tabla 5); esto puede ser el resultado del proceso de deberse a la competencia natural que afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas, o bien, el grado de tolerancia a la sombra de las especies presentes (Castañeda y Hansen, 2007; Granados-Sánchez *et al.*, 2007).

Tabla 5. Número y porcentaje de individuos por estrato en cada piso altitudinal.

Piso altitudinal	1		2		3	
	N ha ⁻¹	N (%)	N ha ⁻¹	N (%)	N ha ⁻¹	N (%)
I (80 – 100%)	11	2.00	18	4.19	20	4.12
II (50 – 80%)	101	18.70	106	24.87	82	16.33
III (0 – 50%)	427	79.21	301	70.94	400	79.68
Total	539	100	424	100	502	100

La figura 3 muestra que el estrato I de cada uno de los pisos es dominado en altura por especies similares; el piso 1 estuvo liderado por *Pseudotsuga menziesii* con alturas máximas de 31.50 m; en el piso 2 dominó igualmente *Pseudotsuga menziesii* con alturas de hasta 31.00 m y por su parte el piso 3 *Abies durangensis* fue el de mayor densidad con alturas máximas de 27.50 m.

El estrato II correspondiente a la altura media de los árboles reflejó dominancia de *Pinus engelmannii* con alturas máximas de 24.24 m para el piso 1; el piso 2 mayormente representado por *Abies durangensis* con alturas hasta de 24.80 m y el piso 3 fue igualmente dominado por *Abies durangensis* con alturas máximas de 24.00 m.

Finalmente, el estrato III designado a los individuos de menor altura, mostró mayor densidad de *Quercus sideroxyla* con alturas máximas de 15.15 m en el piso 1, mientras que el piso 2 estuvo representado por *Abies durangensis* con individuos con alturas hasta de 15.40 m y *Abies durangensis* en el piso 3 fue el de mayor densidad con alturas máximas de 15.00 m.

La figura 3 presenta los valores calculados para el índice *A* evidenciando una reducción de la diversidad estructural vertical al aumentar la altitud, lo cual indica que el piso 1 está a 29.10% de su máxima diferenciación dimensional (100%), el piso 2 a 33.93% y el 3 39.01%; esto se obtiene cuando los árboles se encuentran equitativamente distribuido entre estratos y especies, al igual que lo mencionado por Rubio-Camacho *et al.*, (2014) el bosque aquí evaluado es heterogéneo en relación a la altura de sus individuos. Nuestros resultados coinciden con los de Graciano-Ávila *et al.*, (2020) quienes obtuvieron un *Arel* similar en evaluaciones cada cinco años (2007, 2012 y 2017) de un bosque templado de Pueblo Nuevo, Durango y son ligeramente menores a los valores reportados por Ramos *et al.*, (2017) y Silva-García *et al.*, (2021) quienes obtuvieron una diversidad relativa (*Arel*) de 83.5% y 77.92%, respectivamente en bosques templados en Nuevo León y Durango.

Lo anterior indica que estos bosques presentan heterogeneidad de especies en los estratos de altura, lo que asegura la existencia de riqueza de especies suficiente para el reclutamiento de individuos en estratos inferiores. Existen otros bosques que presentan menor cantidad de especies y los estratos de altura están conformados por escasas especies, aunque abundantes, como el evaluado por Manzanilla *et al.*, (2020) en cuatro sitios de un bosque mixto de *Pinus* – *Quercus* en Galeana, Nuevo León con valores de *Arel* de 41.07, 42.07, 45.52 y 55.39%.

La figura 3 muestra gráficamente el recambio de especies entre el piso 1 y los pisos 2 y 3. Se observa que en el piso 1 dominan los géneros *Quercus* y *Pinus* en términos de densidad (N ha) y altura; a medida que aumenta la altitud, los pisos 2 y 3 se ven dominados por *Pseudotsuga* y *Abies*, además, se observa la incorporación de los géneros *Populus* y *Picea* en el piso 3. Estos patrones de recambio de especies entre pisos altitudinales reflejan la adaptación de las especies a las condiciones ambientales específicas de cada piso, ya que las especies que no consiguen adaptarse desaparecerán por estrés fisiológico (Parmesan, 2006; Brown *et al.*, 2015). Körner y Paulsen (2004) mencionan que esto puede ocurrir ya que, con el aumento de la altitud disminuyen la evapotranspiración y la temperatura, aumentando también la cantidad de agua en el suelo; por lo que algunas especies se desarrollan de mejor manera a estas condiciones.

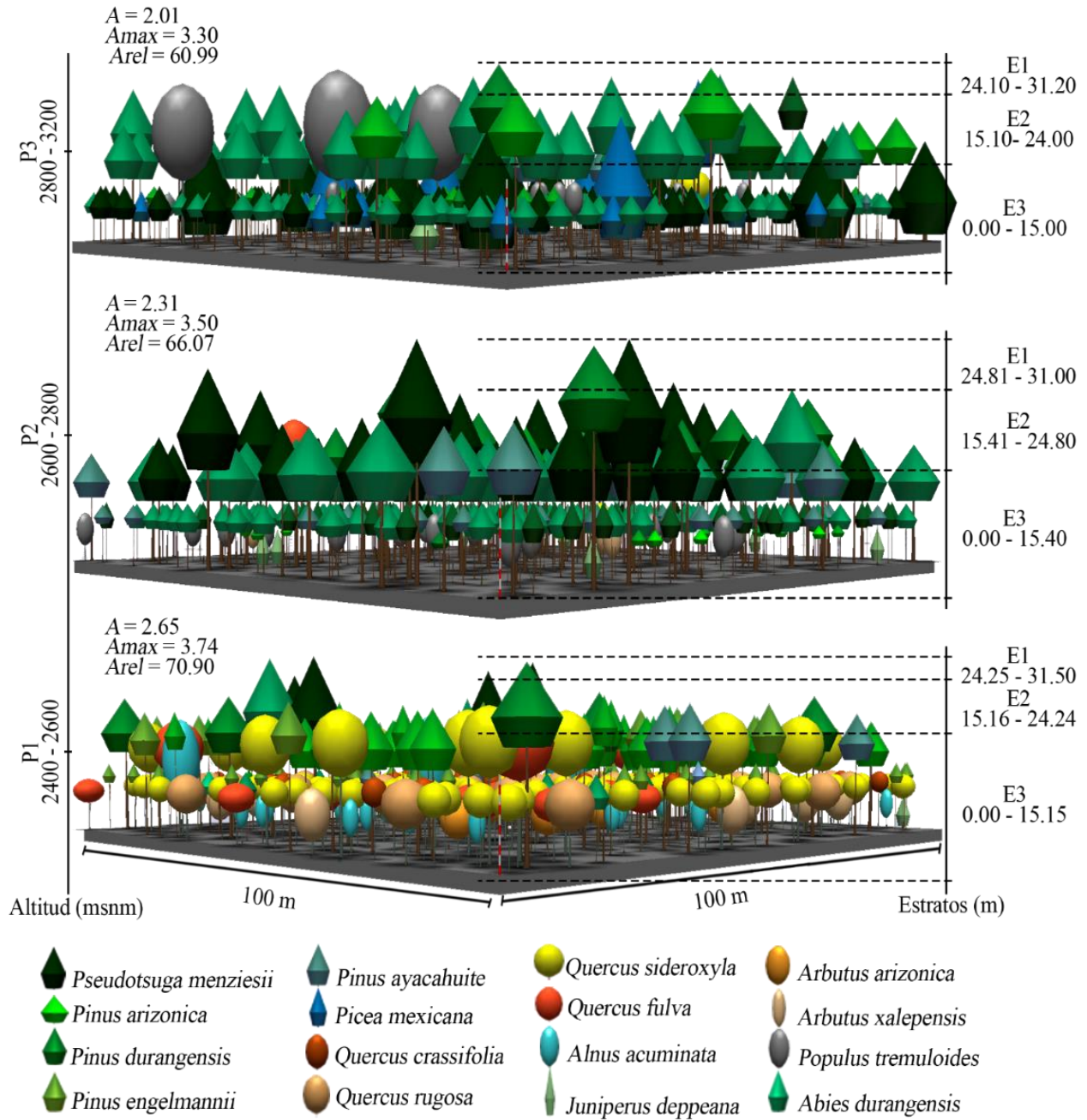


Fig. 3. Estructura vertical del gradiente altitudinal de acuerdo con los valores medios de altura de los árboles a partir del índice A de Pretzsch.

Evaluación de la regeneración natural

La densidad de regeneración fue mayor que la densidad de los árboles adultos en los tres pisos evaluados, lo que en general es indicador de una condición buena. Se observó que el 92.86%, 63.64% y 66.67% de las especies tuvieron buena regeneración natural en los pisos 1, 2 y 3 respectivamente (Tabla 8).

El piso 1 muestra una baja regeneración natural de *Pinus arizonica* a pesar de su alta densidad de árboles adultos, siendo la tercera especie más abundante en esa sección del bosque (Tabla 8). En el piso 2, *Pinus arizonica*, *Juniperus deppeana*, *Quercus fulva* y *Quercus rugosa* presentaron baja regeneración, siendo solo *Pinus arizonica* la especie con una densidad regular de árboles adultos (Tabla 8). En el piso 3, *Pinus arizonica*, *Quercus sideroxyla* y *Juniperus deppeana* mostraron mala regeneración, nuevamente con *Pinus arizonica* presentando una buena densidad de árboles adultos (Tabla 8).

Sotelo *et al.*, (1998) menciona que la germinación de la regeneración de *Pinus arizonica* es mayor en condiciones de dosel abierto, por lo que se deduce que sobre todo en los pisos 2 y 3 del presente estudio la regeneración de esta especie es limitada por la dominancia de géneros como *Pseudotsuga* y *Abies*, quienes tienen individuos de mayores dimensiones. La prueba Shapiro-Wilk mostró que tanto la densidad de árboles adultos como la densidad de regeneración no tienen normalidad en sus datos por sitio, mientras que su comparación mediante la prueba Wilcoxon, no detectó diferencias significativas entre las mismas (p-value = piso 1: 0.062 - 0.819, piso 2: 0.101 - 0.673 y piso 3: 0.077 - 0.791).

Tabla 8. Estado y densidad de árboles adulto y regeneración de los tres pisos altitudinales.

PA	Especie	Árboles adultos	Regeneración	Estado
		D (N ha ⁻¹)	D (N ha ⁻¹)	
1	<i>Quercus sideroxyla</i>	169	1108	B
	<i>Pinus engelmannii</i>	75	292	B
	<i>Pinus arizonica</i>	77	15	M
	<i>Alnus acuminata</i>	39	262	B
	<i>Quercus fulva</i>	35	369	B
	<i>Quercus rugosa</i>	29	246	B
	<i>Pinus durangensis</i>	14	31	B
	<i>Pinus ayacahuite</i>	18	492	B
	<i>Arbutus xalapensis</i>	19	662	B
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	6	138	B
	<i>Quercus crassifolia</i>	25	169	B
	<i>Abies durangensis</i>	16	92	B
	<i>Arbutus arizonica</i>	9	31	B
<i>Juniperus deppeana</i>	8	185	B	
	Media ± Error estándar	39 ± 11.72	292 ± 79.63	
2	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	109	356	B
	<i>Abies durangensis</i>	162	867	B
	<i>Pinus ayacahuite</i>	59	289	B
	<i>Pinus durangensis</i>	23	22	R

	<i>Pinus arizonica</i>	33	22	M
	<i>Populus tremuloides</i>	22	467	B
	<i>Juniperus deppeana</i>	8	0	M
	<i>Arbutus xalapensis</i>	4	133	B
	<i>Quercus fulva</i>	1	0	M
	<i>Quercus rugosa</i>	1	0	M
	<i>Quercus sideroxyla</i>	1	356	B
	Media ± Error estándar	39 ± 15.81	228 ± 82.61	
	<i>Abies durangensis</i>	268	1813	B
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	104	227	B
	<i>Picea mexicana</i>	47	120	B
	<i>Populus tremuloides</i>	30	107	B
3	<i>Pinus arizonica</i>	27	0	M
	<i>Pinus ayacahuite</i>	19	27	B
	<i>Pinus durangensis</i>	5	27	B
	<i>Quercus sideroxyla</i>	1	0	M
	<i>Juniperus deppeana</i>	1	0	M
	Media ± Error estándar	56 ± 28.60	258 ± 196.10	

*PA = Piso altitudinal, D = densidad, B = buena, R = regular y M = mala.

El gradiente altitudinal mostró que estos bosques cuentan con potencial suficiente de regeneración, teniendo una media similar en la densidad de árboles jóvenes; la mayoría de las especies evidenció buen porcentaje de regeneración, lo que conllevaría a mantener la provisión de servicios ecosistémicos como la captura de carbono, recarga de acuíferos y conservación de hábitats (Bennett *et al.*, 2009; CONABIO, 2018; Rodríguez *et al.*, 2006), ya que se garantiza la perpetuidad de la masa forestal.

En el piso 1, únicamente *Pinus arizonica* presentó regeneración deficiente (mala), aunque también hubo pocos individuos adultos de la especie, los pisos 2 y 3 presentaron mala regeneración en cuatro y tres especies respectivamente; esto, puede deberse a que los géneros *Pseudotsuga* y *Abies* son dominantes y sus individuos son de mayor altura y cobertura de copa comparados con géneros como *Pinus* y *Quercus* que, además, son intolerantes a la sombra y no tienen las condiciones adecuadas para su regeneración natural lo que provoca una mayor cobertura de dosel de individuos de *Pseudotsuga* y *Abies* (García *et al.*, 2020; García-García *et al.*, 2021; Granados-Sánchez *et al.*, 2007).

Correlación entre regeneración natural y factores abióticos

La prueba de Shapiro-Wilk manifestó que las variables “Pendiente”, “Altitud” y “Apertura de dosel” cumplen con el supuesto de normalidad en el piso 1, ya que los valores “W” fueron cercanos a 1, 0.89 (p = 0.2080), 0.90 (p = 0.2080) y 0.76 (p = 0.2080) respectivamente. El piso 2 de igual manera mostró normalidad para las tres variables, variables “Pendiente” (W = 0.84, P = 0.0851), “Altitud” (W = 0.91, P = 0.4370) y “Apertura de dosel” (W = 0.64, P < 0.0001). Los valores para el piso 3 también fueron normales para cada una de las variables obteniendo “Pendiente” (W = 0.85, P = 0.0502), “Altitud” (W = 0.97, P = 0.8840) y “Apertura de dosel” (W = 0.76, P < 0.0011).

La correlación de Pearson entre la densidad (N ha) de regeneración y los factores abióticos indicó que en el piso 1, la variable "Altitud" de acuerdo con Cuellar *et al.*, (2018) mostró una correlación negativa débil (-0.15), mientras que "Pendiente" y "Apertura de dosel" presentaron una correlación positiva débil (0.18). En el piso 2, se encontraron correlaciones positivas débiles (0.41, 0.14 y 0.55) para "Altitud", "Pendiente" y "Apertura de dosel", respectivamente. En el piso 3, se observaron correlaciones positivas débiles entre la densidad de regeneración y las tres variables evaluadas: "Altitud" (0.03), "Pendiente" (0.06) y "Apertura de dosel" (0.08).

La relación entre la regeneración y los factores abióticos considerando muestran que el gradiente altitudinal, en este caso, no tienen relevancia en el establecimiento de la regeneración, ya que su correlación es débil o negativa, esta última se dio en el piso 1 el cual se encuentra bajo mayor perturbación antropogénica (aprovechamiento forestal, caminos, asentamientos humanos, etc). A pesar de que la altitud influye en la temperatura, humedad ambiental y características del suelo y puede repercutir en la supervivencia de la regeneración (Romahn-Hernández *et al.*, 2020) algunos autores han indicado la poca influencia de la altitud o la presencia de regeneración en diversas altitudes en bosques templados del mundo (Bharali *et al.*, 2012; Tiwari *et al.*, 2020).

De igual manera, la pendiente, aunque tuvo una correlación positiva, es débil en los tres pisos, lo que refleja una baja influencia en la regeneración o que existen diversos factores que podrían estar relacionados con su establecimiento. Gebeyehu *et al.*, (2019) mencionan que la pendiente pronunciada en los bosques no brinda un suelo estable debido a su estructura, y puede provocar mortalidad de plántulas. Además, el microambiente creado por las pendientes se modifica por la intensidad y duración de la luz diurna lo que puede influir en el desarrollo de la vegetación (Yadav & Gupta, 2006).

Lo anterior se relaciona directamente con la apertura de dosel, el factor de mayor impacto y relación en el establecimiento de la regeneración natural del presente estudio, sobre todo en el piso 2 donde fue positiva moderada, esto puede ser así ya que la apertura del dosel proporcionar buenas condiciones para la regeneración de especies intolerantes a la sombra, las cuales abundan en el área de estudio.

En el presente estudio, la mayoría de las especies evaluadas requieren una apertura de dosel para su desarrollo. Esto concuerda con investigaciones anteriores (Dezzotti *et al.*, 2003; Promis *et al.*, 2010; Sola *et al.*, 2015) que han demostrado que una mayor apertura de dosel favorece la densidad de regeneración natural y desarrollo de árboles jóvenes en bosques templados.

CONCLUSIONES

A lo largo del gradiente altitudinal la composición fue dominada por las familias Pinaceae y Fagaceae, las cuales suelen ser representativas en los bosques templados de México. Sin embargo, el número de especies fue disminuyendo conforme aumento la altitud, de la misma manera se comportaron la riqueza y diversidad de especies. Algunos autores mencionan que esta disminución puede ser derivada por diversos factores como la radiación solar, el agua, los nutrientes, la temperatura, entre otros. Por otro lado, se encontró un mayor grado de similitud en composición de especies entre los pisos 2 y 3 donde dominaron los géneros *Pseudotsuga* y *Abies*, observándose un recambio de especies notable entre estos y el piso 1, lo cual indica que cada piso altitudinal alberga especies únicas y desempeña un papel vital en la estructura y la función del ecosistema en su conjunto.

La estructura vertical de los pisos evaluados mostró que existe una diversidad media - alta respecto a la altura del arbolado, donde presentó heterogeneidad de especies en los estratos de altura, asegurando el reclutamiento de individuos en estratos inferiores; esta diversidad descendió con el aumento de la altitud debido a la dominancia en altura de individuos de

géneros e *Pseudotsuga* y *Abies*, además, la distribución diamétrica reflejó que el gradiente presenta regeneración natural, evidenciando que se encuentran en una etapa de reclutamiento de individuos. Se encontró que únicamente *Pinus arizonica*, *Quercus fulva*, *Quercus rugosa*, *Quercus sideroxyla* y *Juniperus deppeana* presentaron deficiencia en su regeneración en alguno de los pisos altitudinales, intuyendo que esto sucede por la amplia dominancia de otras especies en el área, aunque no hubo diferencias significativas entre su densidad y la del arbolado adulto, lo cual nos encamina a generar investigación especializada sobre el comportamiento de la regeneración. Aun así, encontramos que la apertura de dosel fue el factor mayormente relacionado con la densidad de regeneración, propiciando mejores condiciones para la regeneración, especialmente a especies intolerantes a la sombra, las cuales predominan en el gradiente evaluado.

Consideramos que la evaluación de los ecosistemas a través de gradientes altitudinales es importante para fortalecer el conocimiento y comprensión de los distintos cambios que se presentan a través de las variaciones topográficas y climáticas, así como la reacción que tiene la distribución y comportamiento de las especies frente a estos.

AGRADECIMIENTOS

Al personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) - Dirección Regional Norte y Sierra Madre Occidental por el apoyo brindado para la ejecución de este estudio en el APFF Cerro Mohinora en Guadalupe y Calvo, Chihuahua.

LITERATURA CITADA

- Aguirre, C. O. A. (2002). Índices para la caracterización de la estructura del estrato arbóreo de ecosistemas forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 27(92), 5-27. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/900>
- Aguirre, O., Hui, G., Von Gadow, K., & Jiménez, J. (2003). An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management*, 183(1-3), 137-145. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00102-6)
- Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo Forestal en el Siglo XXI. *Madera y Bosques*, 21, 17-28. <https://doi.org/10.21829/MYB.2015.210423>
- Alanís Rodríguez, E., Mora Olivo, A., & Marroquin de la Fuente, J. S. (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación*. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Arizaga, S., J. Martínez Cruz, M. S. C. y M. A. B. G. (2009). *Manual de encinos michoacanos*. Instituto, 150.
- Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. G. y E. L. (coordinadores). (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión N.
- Atalay, I. (2006). The effects of mountainous areas on biodiversity: a case study from the northern Anatolian Mountains and the Taurus Mountains. *Grazer Schriften Der Geographie Und Raumforschung*, 41, 17-26. www.unibas.ch/gmba
- Beals, E. W. (1984). *Advances in Ecological Research*. Bray-Curtis ordination: An effective strategy for analysis of multivariate ecological data. Orlando, Florida: Academic Press.
- Bennett, E. M., Peterson, G. D., & Gordon, L. J. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 12(12), 1394-1404. <https://doi.org/10.1111/J.1461-0248.2009.01387.X>
- Bharali, S., Paul, A., Khan, M. L., & Singha, L. B. (2012). Impact of Altitude on Population Structure and Regeneration Status of Two *Rhododendron* Species in a Temperate Broad Leaved Forest of Arunachal Pradesh, India. *International Journal of Ecosystem*, 2(1), 19-27. <https://doi.org/10.5923/J.IJE.20120201.04>
- Brown, C. J., M. I. O'Connor, E. S. Poloczanska, D. S. Schoeman, L. B. Buckley, M. T. Burrows, C. M. Duarte, B. S. Halpern, J. M. Pandolfi, C. Parmesan and A. J.

- Richardson. (2015). Ecological and methodological drivers of species' distribution and phenology responses to climate change. *Global Change Biology* 22(4): 1548-1560. <https://doi.org/10.1111/gcb.13184>
- Buendía-Rodríguez, E., Treviño-Garza, E. J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., & Pompa-García, M. (2019). Estructura de un ecosistema forestal y su relación con el contenido de carbono en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(54). <https://doi.org/10.29298/RMCF.V10I54.149>
- Castañeda, C., & Hansen, R. D. (2007). *Estudios botánicos en la Cuenca Mirador: Desarrollo de vegetación y su significado cultural*. In *XX Simp*, 111–120.
- Chauhan, P., J. Negi, L. Singh, and R. M. (2008). Regeneration Status of Sal Forests of Doon Valley. *Annals of Forestry*, 16, 178–182.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2017). *Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Papigochic*.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2014). *Inventario nacional forestal y de suelos 2009 - 2014. Informe de resultados*. <https://snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Resultados%2520Hist%25C3%25B3ricos%2520INFyS/2009%2520-%25>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2018). *Bosques templados*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado>
- CONAFOR. (2012). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe 2004-2009*. Coordinación General de Planeación e Información a Través de La Gerencia de Inventario Forestal y Geomática. Comisión Nacional Forestal, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Corral, R. J., Jiménez P, J., Aguirre, C. Ó. A., & Corral, R. S. (2005). Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el bosque mesófilo de montaña “El Cielo”, Tamaulipas, México. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, ISSN 1131-7965, Vol. 14, N° 2, 2005, Págs. 217-228, 14(2), 217–228. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1223634&info=resumen&idioma=SPA>
- Cortés-Pérez, M., De León-González, F., Paz-Pellat, F., Leyva-Pablo, T., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A., & Fuentes-Ponce, M. (2021). Almacenamiento de carbono aéreo en un bosque templado de Oaxaca: manejo de alta y baja intensidad. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742440–e2742440. <https://doi.org/10.21829/MYB.2021.2742440>
- Cuellar, Q, J. C., Arciniegas, J. L., & Ortiz, J. H. (2018). *Modelo para la medición de QoE en IPTV*.
- da Cunha, T. A., Vargas, M. J. O., & Escalier, H. M. (2009). Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. *Documento Técnico*, 5, 27.
- 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>
- Dezzotti, A., Sbrancia, R., Rodríguez-Arias, M., Roat, D., & Parisi, A. (2003). Regeneración de un bosque mixto de *Nothofagus* (*Nothofagaceae*) después de una corta selectiva. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76(4), 591–602. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2003000400004>
- Encina-Domínguez, J. A. (2015). Estructura y composición de especies de los bosques de *Abies vejarii* Martínez en Coahuila, México. In *Ecología, Biotecnología y Conservación del Género Abies en México* (pp. 43–60). Editorial Académica Española.
- García, S. A. G., Rodríguez, E. A., Calderón, O. A. A., Garza, E. J. T., & Ávila, G. G. (2020). Regeneración y estructura vertical de un bosque de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(58). <https://doi.org/10.29298/RMCF.V11I58.665>
- García-García, S. A., Alanís-Rodríguez, E., Rubio-Camacho, E. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., & Graciano-Ávila, G. (2021). Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque de *Pseudotsuga menziesii* en Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732242–e2732242. <https://doi.org/10.21829/MYB.2021.2732242>

- Gebeyehu, G., Soromessa, T., Bekele, T., & Teketay, D. (2019). Species composition, stand structure, and regeneration status of tree species in dry Afromontane forests of Awi Zone, northwestern Ethiopia. *Ecosystem Health and Sustainability*, 5(1), 199–215. <https://doi.org/10.1080/20964129.2019.1664938>
- González, C. R., Treviño, G. E. J., González, T. M. A., Duque, M. Á., & Gómez, C. M. (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), 36-65. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.142>
- Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., & Lujan-Soto, J. E. (2017a). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 535–542. <https://doi.org/10.19136/ERA.A4N12.1114>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Corral-Rivas, J. J. (2020). Cambios en la composición y estructura de especies arbóreas en un bosque templado de Durango, México. *Acta Botanica Mexicana*, 127. <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.
- Hernández, R. V., López-Mata, L., Cruz-Rodríguez, J. A., & Luna, C. M. (2022). Nicho de regeneración de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en el Monte Tláloc, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, México. *Botanical Sciences*, 100(2), 331-344. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2912>
- Hernández-Moreno, J. A., Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A. M., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V. J., & Vera-Castillo, J. A. G. (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono, en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques*, 26(1). <https://doi.org/10.21829/MYB.2020.2611802>
- Holguín-Estrada, V. A., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., Yerena-Yamallel, J. I., & Pequeño-Ledezma, M. A. (2021a). Estructura vertical de un bosque de galería en un gradiente altitudinal en el noroeste de México. *Polibotánica*, 0(51), 55–71. <https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.51.4>
- Holguín-Estrada, V. A., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., Yerena-Yamallel, J. I., & Pequeño-Ledezma, M. A. (2021b). Estructura y composición florística de un bosque de galería en un gradiente altitudinal en el noroeste de México. *Madera y bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722123>
- Jadán, O., Cedillo, H., Zea, P., Quichimbo, P., Peralta, Á., & Vaca, C. (2016). Relación entre deforestación y variables topográficas en un contexto agrícola ganadero, cantón Cuenca. *Bosques Latitud Cero*, 6(1).
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, 113(2), 363–375. <https://doi.org/10.1111/J.2006.0030-1299.14714.X>
- Körner, C., & Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of biogeography*, 31(5), 713-732. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x>
- Luna, R. E. O., Cantú, S. I., Yáñez, D. M. I. (2020). Efectos del manejo forestal en la composición y diversidad de la regeneración natural arbórea en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Polibotánica*, 0(50), 19–30. <https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.50.2>
- Magurran, A. E. (2021). Measuring biological diversity. *Current Biology*, 31(19), R1174–R1177. <https://doi.org/10.1016/J.CUB.2021.07.049>
- Malizia, A., Blundo, C., Carilla, J., Osinaga Acosta, O., Cuesta, F., Duque, A., ... & Young, K. R. (2020). Elevation and latitude drives structure and tree species composition in Andean forests: Results from a large-scale plot network. *PLoS one*, 15(4), e0231553. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231553>

- Mann, H. y Whitney, D. (1947). *On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other*. *Ann Math Stat.*
- Manzanilla, Q. G. E., J. M. M. Balderas., E. J. T. Garza., E. J., Ó. A. A. Calderón., E. A. Rodríguez., & J. I. Y. Yamallel. (2020). Diversidad, estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61), 94–123. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V11I61.703>
- Martínez-Calderón, V. M., Sosa-Ramírez, J., Siqueiros-Delgado, M. E., & Díaz-Núñez, V. (2021). Composición, diversidad y estructura de especies leñosas en los bosques templados de Monte Grande, Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Acta Botanica Mexicana*, 2021(128), 1–20. <https://doi.org/10.21829/ABM128.2021.1829>
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Species distributions models: A synthetic revision. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217–240. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37(1): 637-669.
- Pérez de la Rosa, J. A. (1998). Promoción de una variedad de pino serotino mexicano a nivel de especie. *Boletín Del Instituto de Botánica*, 5, Universidad de Guadalajara (IBUG). 127-135.
- Pretzsch, H. (2009). Forest Dynamics, Growth, and Yield. *Forest Dynamics, Growth and Yield*, 1–39. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4_1
- Promis, A., Caldentey, J., & Ibarra, M. (2010). Microclima en el interior de un bosque de *Nothofagus pumilio* y el efecto de una corta de regeneración. *Bosque (Valdivia)*, 31(2), 129–139. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000200006>
- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <https://www.r-project.org/>
- Rapoport, E. H. (1975). Aerografía: estrategias geográficas de las especies. Fondo cultural económica. 624
- Rascón-Solano, J., Galván-Moreno, V. S., Aguirre-Calderón, O. A., & García-García, S. A. (2022). Caracterización estructural y carbono almacenado en un bosque templado frío censado en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70), 136–165. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V13I70.1123>
- Reyes, J. C. R., Garza, E. J. T., Rodríguez, E. B., Calderón, O. A. A., & Martínez, J. I. L. (2017). Productividad y estructura vertical de un bosque templado con incidencia de incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(43), 064–088. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V8I43.66>
- Rodríguez, J. P., Beard, T. D., Bennett, E. M., Cumming, G. S., Cork, S. J., Agard, J., Dobson, A. P., & Peterson, G. D. (2006). Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services. *Ecology and Society*, 11(1). <http://www.jstor.org/stable/26267786>
- 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). <https://doi.org/10.22201/ENESL.20078064E.2020.22.72751>
- Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., & Avila-Flores, D. (2014). Diversidad y distribución vertical de especies. *Ciencia UANL*, 17(65), 34. <http://core.ac.uk/download/pdf/19881652.pdf#page=35>
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México* (Editorial Limusa, Ed.).
- Sáenz-Romero, C., Snively, A. E., & Lindig-Cisneros, R. (2003). Conservation and restoration of pine forest genetic resources in México. *Silvae Genetica*, 52(5–6), 233–237. <https://digitalcommons.cwu.edu/studentarticles>
- Silva-García, J. E., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jurado-Ybarra, E., Jiménez-Pérez, J., & Vargas-Larreta, B. (2021). Estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del noroeste de México. *POLIBOTÁNICA*, 0(52). <https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.52.7>

Recibido:
28/enero/2023

Aceptado:
16/junio/2023

- Silva-González, E., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Alanís-Rodríguez, E., & Corral-Rivas, J. J. (2021). Efecto de tratamientos silvícolas en la diversidad y estructura forestal en bosques templados en Durango, México. *Madera y Bosques*, 27(2). <https://doi.org/10.21829/MYB.2021.2722082>
- Sola, G., Attis Beltrán, H., Chauchard, L., & Gallo, L. (2015). Effect of silvicultural management on the *Nothofagus dombeyi*, *N. alpina* and *N. obliqua* forest regeneration within the Lanín Natural Reserve (Argentina). *Bosque (Valdivia)*, 36(1), 113–120. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000100012>
- Sotelo, J. M. C., Martínez, A. V., & Musálem, M. A. (1998). Comportamiento de la repoblación natural de *Pinus arizonica* Engelm. bajo diferentes coberturas. *Madera y Bosques*, 4(2), 39-44.
- Sprauer, S., J, Hansen., & J, Nagel. (2019). *TreeGrOSS: ForestSimulation Version 8.0.6* (Region Nordwestdeutschland).
- Tiwari, O. P., Sharma, C. M., & Rana, Y. S. (2020). Influence of altitude and slope-aspect on diversity, regeneration and structure of some moist temperate forests of Garhwal Himalaya. *Tropical Ecology*, 61(2), 278–289. <https://doi.org/10.1007/S42965-020-00088-4/METRICS>
- van der Putten, W. H., Bradford, M. A., Pernilla Brinkman, E., van de Voorde, T. F. J., & Veen, G. F. (2016). Where, when and how plant–soil feedback matters in a changing world. *Functional Ecology*, 30(7), 1109–1121. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12657>
- Xu, M., Ma, L., Jia, Y., & Liu, M. (2017). Integrating the effects of latitude and altitude on the spatial differentiation of plant community diversity in a mountainous ecosystem in China. *PloS one*, 12(3), e0174231. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174231>
- Yadav, A. S., & Gupta, S. K. (2006). Effect of micro-environment and human disturbance on the diversity of woody species in the Sariska Tiger Project in India. *Forest Ecology and Management*, 225(1–3), 178–189. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2005.12.058>