

Estructura y regeneración en un bosque de oyamel en una Área Natural Protegida al noroeste de México

Structure and regeneration in an oyamel fir forest in a Natural Protected Area in northwestern Mexico

Emanuel Molina-Marchan¹ , José Israel Yerena-Yamalle^{1*} , Eduardo Alanís-Rodríguez¹ ,
Eduardo Estrada-Castillón¹ , Raúl Narváez-Flores² 

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

²Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. km 2.5 carretera Delicias-Rosales. CP. 33000. Delicias, Chihuahua, México.

*Autor de correspondencia: israel.yerena@gmail.com

Artículo científico

Recibido: 19 de marzo 2024

Aceptado: 08 de mayo 2024

RESUMEN. Comprender la estructura y diversidad forestal permite elaborar y analizar estrategias para el manejo sustentable de los recursos naturales. El objetivo de la investigación fue contribuir al conocimiento de la estructura arbórea, así como su capacidad de regeneración en un gradiente altitudinal en un Área Natural Protegida, en Madera, Chihuahua. El estudio comprendió tres intervalos altitudinales: inferior (2 307 a 2 466 m), medio (2 466 a 2 625 m) y superior (2 625 - 2 785 m), en los que se distribuyeron 30 sitios circulares de 500 m² donde se midió el diámetro y altura del arbolado superior, así como la densidad de la regeneración. La estructura vertical se obtuvo con el índice de Pretzsch (*A*), además, se evaluó el índice de valor de importancia (*IVI*), la diversidad con el índice de Shannon-Wiener (*H'*) y riqueza con Margalef (*D_{mg}*), asimismo, se estimó la capacidad de renuevo y los daños presentes. Los valores de *A* muestran la mayor homogeneidad estructural en el intervalo 2; la familia Pinaceae registró el peso ecológico superior en el *IVI*; los valores de *H'* y *D_{mg}* fueron superiores en el estrato II, sin embargo, todos se consideran de baja diversidad y riqueza; las especies *Abies concolor* y *Pseudotsuga menziesii*, mostraron la mayor proporción de regeneración en la comunidad, en la que la supresión es el daño frecuente, no obstante, el 95% de los individuos no presentaron afectaciones. Esta información es de utilidad para la conservación de estas comunidades de importancia ecológica en bosques templados.

Palabras clave: Bosque de coníferas, daños al arbolado, diversidad arbórea, gradiente altitudinal, índice de Pretzsch.

ABSTRACT. Understanding forest structure and diversity allows the development and analysis of strategies for the sustainable management of natural resources. The objective of the research was to contribute to the knowledge of tree structure, as well as its regeneration capacity in an altitudinal gradient in a Natural Protected Area in Madera, Chihuahua. The study included three altitudinal intervals: lower (2 307 to 2 466 m), middle (2 466 to 2 466 m) and upper (2 625 - 2 785 m), in which 30 circular sites of 500 m² were distributed where the diameter and height of the upper trees were measured, as well as the density of regeneration. The vertical structure was obtained with the Pretzsch index (*A*), in addition, the importance value index (*IVI*), diversity with the Shannon-Wiener index (*H'*) and richness with Margalef (*D_{mg}*) were evaluated, as well as the renewal capacity and damage present. The values of *A* show the greatest structural homogeneity in interval 2; the Pinaceae family registered the highest ecological weight in the *IVI*; the values of *H'* and *D_{mg}* were higher in stratum II, however, all are considered of low diversity and richness; the species *Abies concolor* and *Pseudotsuga menziesii*, showed the highest proportion of regeneration in the community, in which suppression is the frequent damage, however, 95% of the individuals were not affected. This information is useful for the conservation of these ecologically important communities in temperate forests.

Keywords: Coniferous Forest, damage to trees, tree diversity, altitudinal gradient, Pretzsch index.

Como citar: Molina-Marchan E, Yerena-Yamalle JI, Alanís-Rodríguez E, Estrada-Castillón E, Narváez-Flores R (2024) Estructura y regeneración en un bosque de oyamel en una Área Natural Protegida al noroeste de México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(2): e4076. DOI: 10.19136/era.a11n2.4076.

INTRODUCCIÓN

Los bosques templados con 34.8 millones de hectáreas representan una cuarta parte de la vegetación forestal de México, se componen principalmente por masas mixtas de *Pinus* y *Quercus* (INEGI 2021); no obstante, las sierras templadas del año 2020 al 2021 presentaron una pérdida de cobertura forestal bruta de 43 155 ha (CONAFOR 2023); lo que ocasiona erosión, pérdida de biodiversidad, fragmentación de hábitat y desequilibrio en el ciclo hidrológico (Bodo *et al.* 2021). Este tipo de ecosistema es necesario para alcanzar la sostenibilidad de los recursos naturales, así como el suministro de servicios ambientales (Nunes 2023). A pesar de su gran relevancia ecológica, los estudios de diversidad y estructura en bosques templados dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP) como los realizados por García-García *et al.* (2023) y Martínez-Calderón *et al.* (2021) aún son escasos.

Las comunidades de oyamel que se encuentran en estos ecosistemas están conformadas principalmente por los géneros *Abies* Mill. *Pseudotsuga* Carrière y *Picea* A. Dietr. (Rzedowski 1978). El género *Abies* es uno de los más abundantes de la familia Pinaceae, se distribuye en el hemisferio norte en bosques de taiga, boreales y templados (Semerikova *et al.* 2018). Aunque diversos factores como el cambio climático (Nelson *et al.* 2021), plagas (Gómez-Pineda *et al.* 2022) y la tala ilegal (González-Fernández *et al.* 2022) han ocasionado alteraciones perjudiciales en sus poblaciones.

En México los bosques de oyamel se consideran relictos (Requena-Lara *et al.* 2020), cubren una superficie de 160 mil ha (INEGI 2021), y se concentran en la parte central (Rzedowski 2006). En el país se distribuyen 10 especies de *Abies* (Martínez-Méndez *et al.* 2016) y actualmente seis taxones se encuentran en alguna categoría de riesgo en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT 2010). Mientras que Estados Unidos concentra la mayor superficie de la distribución natural de la especie *Abies concolor* (Gordon) Lindl. ex Hildebr, a diferencia de México, que presenta poblaciones reducidas y dispersas en la zona noroeste (González-Gaona *et al.* 2021), con escasos estudios a través de un enfoque particular ecológico en los que se analice esta conífera relictos.

El conocimiento de la diversidad, estructura vertical y horizontal se considera una herramienta fundamental para la conservación, funcionalidad y estabilidad ecológica (Ouyang *et al.* 2020). Debido a que permite conocer el estado actual y desarrollo de procesos ecológicos mediante el funcionamiento y la dinámica (Liu *et al.* 2023), así como las alteraciones que han afectado a una comunidad (Senf *et al.* 2020, Koutecký *et al.* 2022), que ocasionan cambios en la densidad y diversidad (Sharma *et al.* 2023, Sánchez-Pinillos *et al.* 2024).

El gradiente altitudinal es un factor que se relaciona con distintas condiciones abióticas, como microclimas, nutrimentos del suelo y geomorfología (Noulèkoun *et al.* 2021, Ullah *et al.* 2021). Estas variables proporcionan información relevante para comprender la distribución de diversas especies (Zhang *et al.* 2021), principalmente de aquellas que requieren un hábitat especializado, como los géneros *Abies*, *Picea* y *Pseudotsuga* localizados en las partes altas y frías de las montañas (Rzedowski 2006). Por tal razón, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el estado actual de la estructura, diversidad, regeneración y tipos de daños presentes en un bosque de oyamel en una Área Natural Protegida al noroeste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el ANP del Santuario de la Cotorra Serrana Occidental, localizada en el municipio de Madera, Chihuahua (Figura 1). Esta localidad cubre una superficie aproximada de 420 ha, se encuentra dentro de provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (SMO); presenta un clima semifrío subhúmedo C(E)x, la temperatura media anual oscila entre 5 a 12 °C y la precipitación total anual para el 2022 fue 541.5 mm (CONAGUA 2023). Registra altitudes entre 2 307 a 2 785 m, con pendientes formadas por lomeríos, ondulaciones y sierras escarpadas (CONANP 2023).

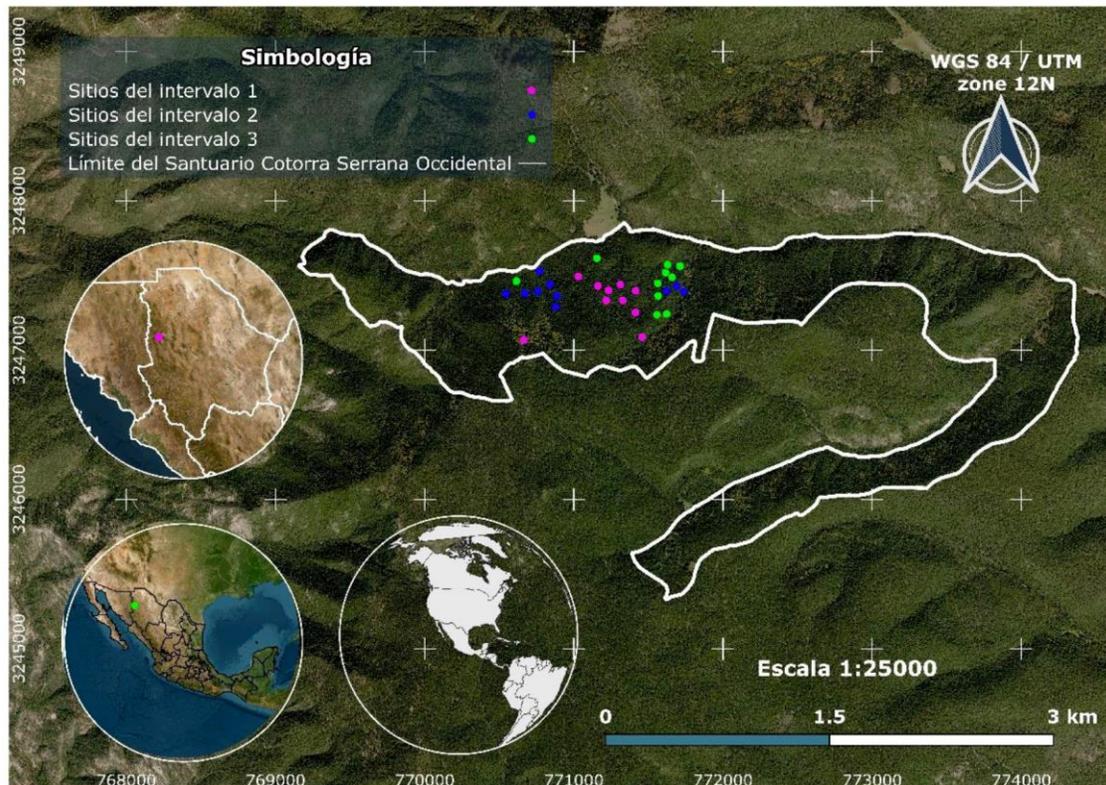


Figura 1. Localización de área de estudio en el Área Natural Protegida del Santuario de la Cotorra Serrana en Madera, Chihuahua.

Análisis muestral

Se definieron tres intervalos altitudinales en la zona núcleo del ANP; el intervalo 1 comprende alturas de 2 625 a 2 785 m, el intervalo 2 entre 2 466 a 2 625 m y el intervalo 3 oscila de 2 307 a 2 466 m. En cada uno de ellos se distribuyeron de forma aleatoria 10 sitios circulares de muestreo con una superficie de 500 m² en exposición norte.

Se consideró estrato arbóreo a los individuos que poseían un diámetro normal ($d_{1.30}$) superior a 7.50 cm, aquellos que presentaban un diámetro ($d_{1.30}$) menor a 7.50 cm con una altura (h) > 25 cm se clasificó como renuevo (CONAFOR, 2017). Para evaluar el arbolado se registró el diámetro normal ($d_{1.30}$) en cm con una forcípula Haglöf Mantax Blue® y la altura total (h) en m se determinó con un hipsómetro Suunto® PM5-1520; para el renuevo se identificó la especie y se

cuantificó la densidad para las diversas poblaciones. La clasificación de daños para las especies arbóreas se realizó de acuerdo con el procedimiento de muestreo versión 19.0 de CONAFOR (2017).

Análisis de la información

La estructura vertical para los tres intervalos altitudinales se determinó mediante el índice de Pretzsch (A) que es una modificación del índice de Shannon (Pretzsch 2009); este indicador genera tres estratos de altura con la referencia del árbol de mayor altura total registrada, en el estrato I se concentran los valores de h entre el 80 al 100%; el estrato II posee las alturas entre el 50 y 80%; y el estrato III comprende los valores inferiores al 50%. A_{max} representa el máximo valor para A dado por las zonas de altura y número de especies; A_{rel} es el valor porcentual estandarizado de A . Las variables del índice A se calcularon con las siguientes ecuaciones: $A = -\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^Z p_{ij} \times \ln p_{ij}$, $A_{max} = \ln(S * Z)$ y $A_{rel} = \frac{A}{\ln(S * Z)} * 100$, donde: S : taxones registrados, Z : estratos de altura, P_{ij} : porcentaje de especies por zona y se estima con la siguiente ecuación: $P_{ij} = n_{ij}/N$, donde: n_{ij} : número de individuos de una misma población (i) para la zona (j) y N : número total de individuos registrados.

La estructura horizontal se analizó por estrato a través del índice de valor de importancia (IVI), para determinar que especies presentan mayor peso ecológico; este indicador se puede emplear con los valores relativos de la abundancia por hectárea ($N \text{ ha}^{-1}$) y dominancia ($m^2 \text{ ha}^{-1}$) (Curtis y McIntosh 1951). Se generó con la siguiente ecuación: $IVI = (Ar + Dr)/2$, donde: Ar : abundancia relativa para la especie i en relación con la abundancia total y Dr : dominancia relativa para el taxón i referente a la dominancia total. La abundancia y dominancia relativa se obtuvieron a partir de las ecuaciones: $Ar = \left(\frac{n_i}{N}\right) * 100$ y $Dr = \left(\frac{g_i}{G}\right) * 100$, donde n_i : cantidad de individuos para la población i , N : total a nivel comunidad, $G = \sum_{i=1}^N g_i$, g_i : área basal de la población i y G : área basal de la comunidad.

La diversidad se evaluó con el índice de Shannon-Wiener (H') (Shannon 1948), obtiene el logaritmo de S al estar distribuidas equitativamente todas las poblaciones (Magurran 2004). El índice de H' se calculó con la siguiente ecuación: $H' = -\sum_{i=1}^S p_i * \ln(p_i)$ y $p_i = \frac{n_i}{N}$, donde: S : riqueza de especies, \ln : logaritmo natural, p_i : proporción de individuos para la especie i respecto al total de individuos, n_i : abundancia de la especie i y N : cantidad total de individuos de la comunidad.

La riqueza arbórea en cada estrato se determinó con el índice de Margalef (Margalef 1972), a través de la siguiente ecuación, $D_{mg} = (S - 1)/\ln N$, donde: S : número de especies registradas y N : abundancia total de la comunidad.

La capacidad de regeneración de cada especie se evaluó mediante lo propuesto por Ledig *et al.* (2000) al obtener la proporción de renuevo y arbolado adulto por cada especie, si el resultado es superior a 1, se considera como un indicativo de permanencia, al menos en la etapa sucesional en la que se encuentra el bosque. Para comprender los daños ocasionados, así como su nivel de impacto a lo largo del gradiente altitudinal debido a plagas, enfermedades, eventos naturales o actividades antropogénicas en las especies arbóreas, se utilizó la clasificación de daños al arbolado de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR 2017).

Análisis estadístico

Para validar el supuesto de normalidad en el índice de Pretzsch y densidad en regeneración se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk y el test de Levene para obtener la homocedasticidad de varianzas ($\alpha = 0.05$), para las variables con distribución normal se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) de una vía ($p < 0.05$) para comprobar si existen efectos significativos, así mismo, las variables no paramétricas se sometieron la prueba Kruskal-Wallis ($p < 0.05$); El análisis de los datos se efectuó con el software estadístico R (R Core Team 2020).

RESULTADOS

Composición florística

En el ANP se registraron tres familias, Pinaceae presentó la mayor cantidad de especies con cinco, por otra parte, Fagaceae y Salicaceae ambas están representadas por una especie. Tanto el intervalo 2 e intervalo 3 albergan la mayor cantidad de taxones con seis distintos, seguido del intervalo 1 con cinco (Tabla 1). Solo las coníferas *Abies concolor*, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Pinus strobiformis* Engelm. y *Pinus arizonica* Engelm. se encontraron en los tres intervalos, a diferencia de *Pinus durangensis* Martínez, que solo se registró en el intervalo 3.

Tabla 1. Riqueza florística en los tres intervalos altitudinales.

Familia	Especie	Presencia	Estatus en la NOM-059-SEMARNAT-2010
Pinaceae	<i>Abies concolor</i> (Gordon & Glend.) Lindl. ex Hildebr.	II, IS e IM	Pr
Pinaceae	<i>Pinus arizonica</i> Engelm.	II, IS e IM	
Pinaceae	<i>Pinus durangensis</i> Martínez	II	
Pinaceae	<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.	II, IS e IM	Pr
Pinaceae	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	II, IS e IM	Pr
Salicaceae	<i>Populus tremuloides</i> Michx.	IM e IS	
Fagaceae	<i>Quercus sideroxylla</i> Bonpl.	II e IM	

Pr: sujeta a protección especial; II: intervalo inferior; IM: intervalo medio; IS: intervalo superior.

Análisis estructural

Se generaron tres categorías de altura respecto a el valor máximo registrado a nivel comunidad en cada intervalo (Tabla 2). En el intervalo 2 e intervalo 3, la mayor densidad para cada clase de altura se concentra en el estrato III, seguido del estrato II y en menor proporción en el estrato I, a diferencia del intervalo 1 que alberga la cantidad más alta de individuos en el estrato II.

Tabla 2. Densidad y categorías de altura para cada estrato en los tres intervalos altitudinales.

Estrato	Categoría de altura (%)	Intervalo 1 (2625 a 2785 m)	N ha ⁻¹	Intervalo 2 (2466 a 2625 m)	N ha ⁻¹	Intervalo 3 (2307 a 2466 m)	N ha ⁻¹
I	80 - 100	19.2 - 24.0 m	168	20.8 - 26.0 m	72	17.6 - 22.0 m	28
II	50 - 80	12.0 - 19.1 m	296	13.0 - 20.7 m	216	11.0 - 17.5 m	276
III	0 - 50	0.0 - 11.9 m	200	0.0 - 12.9 m	384	0.0 - 10.9 m	424

N ha⁻¹: Abundancia por hectárea.

Estructura del intervalo 1

El índice de A para el intervalo 1 registró un valor de 2.04, A_{max} : 2.71 y A_{rel} : 75.42%, a un 24.58% de la máxima diferenciación dimensional. El mayor índice de valor de importancia en el estrato I lo presentó *A. concolor* con 54.59% y *P. arizonica* con 34.93%; el estrato II y estrato III presentan resultados similares, ya que *P. strobiformis* y *A. concolor* poseen el peso ecológico superior con resultados que oscilan entre 44 a 60% y 16 a 24% para cada taxón, respectivamente (Tabla 3). Todas las especies del intervalo se encuentran representadas en los tres estratos, a excepción de *Populus tremuloides* que se registró únicamente en el estrato II con el IVI inferior.

Tabla 3. Índice de valor de importancia y dimensiones en el intervalo 1.

	Especie	Abundancia (N ha ⁻¹)	G (m ² ha ⁻¹)	IVI	dap			h		
					Media	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.
Estrato I	<i>P. arizonica</i>	60.00	5.12	34.93	32.66	21.00	42.00	21.20	20.00	24.00
	<i>P. strobiformis</i>	12.00	1.05	7.08	33.33	30.00	35.00	20.00	20.00	20.00
	<i>P. menziesii</i>	4.00	0.66	3.41	46.00	42.00	50.00	22.00	22.00	22.00
	<i>A. concolor</i>	92.00	8.17	54.59	33.13	23.00	42.00	20.86	20.00	24.00
	Total	168.00	15.01	100.00						
Estrato II	<i>P. arizonica</i>	64.00	3.17	21.62	24.81	16.00	32.00	16.25	12.00	18.00
	<i>P. strobiformis</i>	124.00	6.92	44.53	25.93	10.00	41.00	15.41	12.00	18.00
	<i>P. tremuloides</i>	12.00	0.21	2.75	15.00	14.00	16.00	12.00	12.00	12.00
	<i>P. menziesii</i>	20.00	1.03	6.90	24.80	15.00	32.00	15.40	13.00	18.00
	<i>A. concolor</i>	76.00	3.34	24.20	23.15	12.00	32.00	15.78	12.00	19.00
Total	296.00	14.68	100.00							
Estrato III	<i>P. arizonica</i>	28.00	0.53	14.00	14.85	12.00	23.00	9.28	5.00	10.00
	<i>P. strobiformis</i>	112.00	2.44	60.22	15.85	9.00	28.00	8.10	5.00	10.00
	<i>P. menziesii</i>	20.00	0.34	9.50	14.20	11.00	22.00	7.80	5.00	10.00
	<i>A. concolor</i>	40.00	0.48	16.27	12.20	10.00	13.00	8.90	5.00	10.00
Total	200.00	3.79	100.00							
Total general	664.00	33.47	100.00							

G = área basal de la población por hectárea; IVI = índice de valor de importancia; dap = diámetro a la altura de pecho ($d_{1.30}$); h = altura en metros.

En el estrato I, *P. menziesii* con 46.00 cm presentó la mayor media aritmética en diámetro, al igual que en altura con 22.00 m; también, en el estrato II registró el valor superior de h promedio con 13.00 m, sin embargo, la especie con la cifra más alta en diámetro medio fue *P. strobiformis* con 25.93 cm, al igual que en el estrato III con 15.85 cm y *P. arizonica* obtuvo la mayor altura con 9.28 m (Tabla 3).

Estructura del intervalo 2

El índice de Pretzsch generó un valor de 2.43, un A_{max} de 2.89 y el A_{rel} resultó con el 83.92%, lo que indica que el intervalo 2 presentó la mayor homogeneidad en la distribución de las alturas

en comparación con los demás intervalos altitudinales. *P. arizonica* es la especie dominante en los estratos I con 45.74% y estrato II con 29.79%; *P. menziesii* se presentó como codominante en ambos estratos con valores cercanos al 22%; respecto al estrato III, *P. strobiformis* mostró el peso ecológico superior con 46.40%, seguido de *Quercus sideroxylla* y *A. concolor* con resultados similares al 14% (Tabla 4). Este intervalo es el único que comparte la misma composición en los tres estratos.

Tabla 4. Índice de valor de importancia y dimensiones en el intervalo 2.

	Especie	Abundancia (N ha ⁻¹)	G (m ² ha ⁻¹)	IVI	dap			h		
					Media	Mín.	Máy.	Media	Mín.	Máy.
Estrato I	<i>P. arizonica</i>	32.00	3.20	45.74	35.37	26.00	43.00	22.75	22.00	25.00
	<i>P. strobiformis</i>	4.00	0.25	4.59	28.00	28.00	28.00	22.00	20.00	24.00
	<i>Q. sideroxylla</i>	4.00	0.38	5.60	35.00	32.00	38.00	23.00	23.00	23.00
	<i>P. tremuloides</i>	4.00	0.20	4.22	25.00	24.00	26.00	21.00	19.00	23.00
	<i>P. menziesii</i>	16.00	1.45	21.72	33.50	26.00	41.00	22.75	21.00	26.00
	<i>A. concolor</i>	12.00	1.34	18.13	37.33	33.00	44.00	22.33	22.00	23.00
	Total	72.00	6.81	100.00						
Estrato II	<i>P. arizonica</i>	76.00	4.10	29.79	24.47	9.00	42.00	17.10	13.00	20.00
	<i>P. strobiformis</i>	40.00	3.30	19.08	32.00	22.00	38.00	16.00	13.00	19.00
	<i>Q. sideroxylla</i>	4.00	0.03	1.02	10.00	9.00	11.00	16.00	16.00	16.00
	<i>P. tremuloides</i>	28.00	3.86	17.97	40.00	35.00	65.00	19.85	19.00	20.00
	<i>P. menziesii</i>	44.00	4.31	23.00	33.36	18.00	47.00	17.36	13.00	20.00
	<i>A. concolor</i>	24.00	1.21	9.15	23.83	8.00	33.00	17.50	15.00	20.00
	Total	216.00	16.82	100.00						
Estrato III	<i>P. arizonica</i>	48.00	1.03	12.39	14.58	8.00	30.00	7.50	3.00	12.00
	<i>P. strobiformis</i>	184.00	3.77	46.40	15.28	8.00	27.00	7.93	5.00	12.00
	<i>Q. sideroxylla</i>	48.00	1.32	14.09	17.91	8.00	24.00	6.50	4.00	10.00
	<i>P. tremuloides</i>	8.00	0.22	2.36	17.00	9.00	25.00	7.50	5.00	10.00
	<i>P. menziesii</i>	32.00	1.11	10.75	19.25	9.00	33.00	8.37	4.00	12.00
	<i>A. concolor</i>	64.00	0.95	14.00	13.18	8.00	22.00	6.50	4.00	12.00
	Total	384.00	8.39	100.00						
Total general	672.00	32.03	100.00							

G = área basal de la población por hectárea; IVI = índice de valor de importancia; *dap* = diámetro a la altura de pecho ($d_{1.30}$); *h* = altura en metros.

La especie con el mayor valor promedio de altura fue *Q. sideroxylla* con 23.00 m en el estrato I, en esta misma categoría *A. concolor* resultó con el diámetro superior promedio (37.33 cm). El estrato II es el único que no obtuvo una especie representante de la familia Pinaceae en las máximas dimensiones, ya que *P. tremuloides* generó los mayores valores medios para diámetro

con 40.00 cm y altura con 19.85 m. El estrato III presentó un resultado similar con *P. menziesii*, ya que posee los valores promedios máximos en *dap* (19.25 cm) y *h* promedio (8.37 m).

Estructura del intervalo 3

El valor de *A* obtuvo un resultado de 2.17, el A_{max} presentó un valor de 2.89 y el A_{rel} un 74.94% al 25.06% de su máxima diferenciación; este intervalo registró la menor homogeneidad respecto a los demás. El estrato I del intervalo inferior posee la menor composición de especies con dos taxones (Tabla 5), *P. arizonica* es la conífera con mayor valor de importancia con el 71.05%; en el estrato II de igual manera *P. arizonica* obtuvo el *IVI* máximo con 41.16%, seguido de *P. strobiformis* y *P. menziesii* con valores superiores a 20%; en el estrato de menores dimensiones *P. strobiformis* y *P. menziesii* fueron las especies de mayor valor de importancia, debido a que en conjunto superan el 60%.

Tabla 5. Índice de valor de importancia y dimensiones en el intervalo 3.

	Especie	Abundancia (N ha ⁻¹)	G (m ² ha ⁻¹)	IVI	dap			h		
					Media	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.
Estrato I	<i>P. arizonica</i>	20.00	2.11	71.05	41.00	32.00	44.00	19.60	18.00	22.00
	<i>P. menziesii</i>	8.00	0.87	28.95	48.00	44.00	52.00	20.50	20.00	21.00
	Total	28.00	2.98	100.00						
Estrato II	<i>P. arizonica</i>	120.00	6.58	41.16	24.83	15.00	35.00	14.23	11.00	17.00
	<i>P. strobiformis</i>	76.00	4.79	27.93	29.63	18.00	55.00	13.47	11.00	17.00
	<i>Q. sideroxyla</i>	24.00	1.10	7.61	30.16	19.00	46.00	13.00	11.00	17.00
	<i>P. menziesii</i>	52.00	4.21	21.84	32.46	64.00	19.00	13.53	11.00	17.00
	<i>A. concolor</i>	4.00	0.25	1.45	28.00	26.00	30.00	15.00	15.00	15.00
	Total	276.00	16.92	100.00						
Estrato III	<i>P. durangensis</i>	44.00	0.78	8.81	13.09	8.00	36.00	5.81	3.00	10.00
	<i>P. arizonica</i>	40.00	1.02	9.43	13.00	8.00	22.00	7.30	5.00	9.00
	<i>P. strobiformis</i>	184.00	3.47	37.72	13.28	8.00	22.00	7.32	4.00	10.00
	<i>Q. sideroxyla</i>	76.00	2.25	19.34	16.94	10.00	43.00	6.31	3.00	9.00
	<i>P. menziesii</i>	80.00	3.30	24.70	15.70	8.00	22.00	7.60	3.00	10.00
	Total	424.00	10.83	100.00						
Total general		728.00	30.73	100.00						

G = área basal de la población por hectárea; *IVI* = índice de valor de importancia; *dap* = diámetro a la altura de pecho ($d_{1.30}$); *h* = altura en metros.

Aunque *P. menziesii* mostró el menor *IVI* en el estrato I, es la especie que registra las mayores dimensiones tanto en altura y diámetro promedio con 20.50 m y 48.00 cm, respectivamente; en el estrato II también alcanzó el máximo diámetro medio con 32.46 cm y *A. concolor* la altura máxima promedio (15.00 m); el estrato III es el único en el *Q. sideroxyla* tuvo el diámetro mayor con 16.94 cm y *P. menziesii* la altura media máxima con 7.60 m.

La evaluación de la estructura vertical reveló que existe una oscilación en los valores, al alcanzar el máximo valor en el intervalo 2 y el más bajo en la zona superior del gradiente (intervalo 1). Estadísticamente, el ANOVA no mostró diferencia significativa en los valores de A ($F = 3.42$; $p = 0.058$) para la estructura vertical en los tres intervalos de altura.

Diversidad y riqueza

En los diferentes intervalos de altura, el índice de diversidad de Shannon-Wiener presentó el máximo valor ($H' = 1.60$) en el estrato II del intervalo 2, a diferencia del estrato I en el intervalo 3, que mostró la diversidad inferior con 0.62. El índice de Margalef resultó con valores de baja riqueza, con un comportamiento similar a lo anteriormente expuesto (Figura 2), debido a que en el intervalo 2 de los tres estratos se concentró el mayor valor, con cifras en general inferiores a uno, con excepción del estrato I perteneciente al intervalo 2, con un $D_{mg} = 1.17$, además en este mismo estrato en el intervalo 3 se registró el menor valor con 0.30.

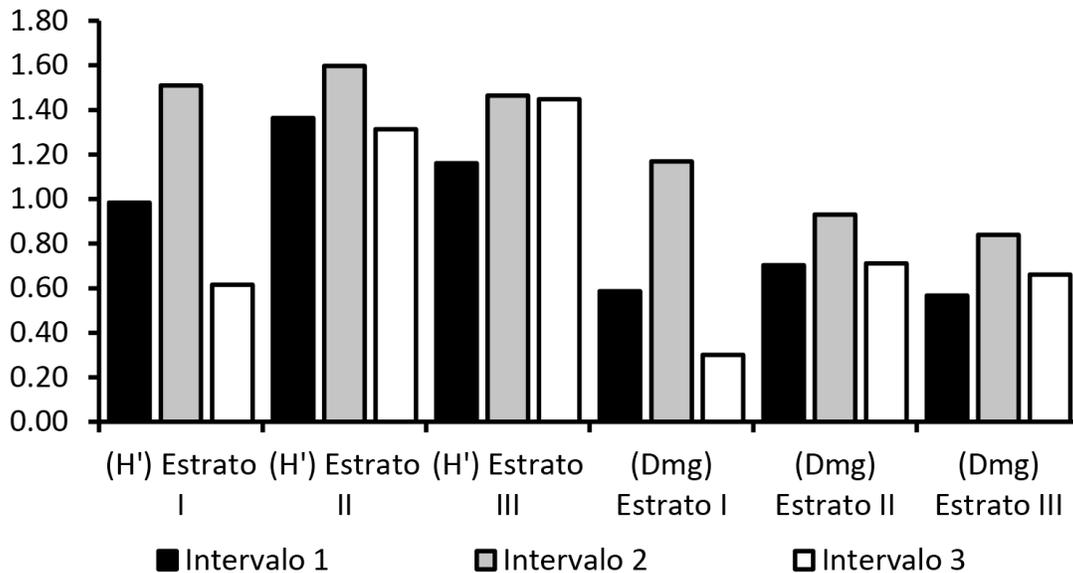


Figura 2. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') y riqueza de Margalef (D_{mg}) en cada estrato por intervalo.

Estado actual de la regeneración

El intervalo 2 con un total de 560 ± 20.27 individuos ha^{-1} , mostró una densidad inferior en comparación con la registrada en el intervalo 1 con una abundancia de 868 ± 55.82 ha^{-1} y en el intervalo 3 con una densidad de 848 ± 16.73 ha^{-1} ; dichas fluctuaciones ocasionaron diferencia significativa en la prueba de Kruskal-Wallis ($H = 13.99$, $gl = 2$, $p = <0.001$). Los intervalos superior e inferior presentaron mayor densidad de renuevo en comparación con el arbolado mayor, y el intervalo 3 es el único con una especie en el estrato mayor sin regeneración (Tabla 6).

Los resultados muestran que el intervalo de mayor altitud presentó la máxima cantidad de taxones con valores superiores a 1, conformado por *P. strobiformis*, *P. menziesii* y *Abies concolor*, esto indica que estas especies tienen una mayor posibilidad de permanecer en la comunidad en la etapa de sucesión actual que se encuentra el bosque. Este análisis reveló que la proporción de renuevo principalmente de la familia Pinaceae tiene una capacidad más eficiente. Las especies

enlistadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 y las consideradas como bosque relicto, poseen en general una positiva regeneración a diferencia de otras que se consideran más abundantes en la actualidad como *P. arizonica*, *P. durangensis* y *Quercus sideroxyla*, lo que resalta la importancia de la conservación de esta ANP para preservar la riqueza florística nacional.

Tabla 6. Proporción entre renuevo y arbolado adulto por intervalo de altura.

Intervalo	<i>Pinus durangensis</i>	<i>Pinus arizonica</i>	<i>Pinus strobiformis</i>	<i>Quercus sideroxyla</i>	<i>Populus tremuloides</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Abies concolor</i>
1	-	0.11	1.40	-	0.67	1.64	1.79
2	-	0.10	0.77	0.86	0.10	1.00	2.24
3	0.18	SR	1.78	0.40	-	2.40	Sr

Sr: Sin renuevo.

Daño en el renuevo y arbolado adulto

El renuevo presentó la mayor cantidad de afectaciones en la parte superior del gradiente con 12 individuos suprimidos, sin embargo, el 98.62% de la regeneración no mostró daño aparente. En el intervalo 2, la única afectación fue la supresión de seis individuos y el 98.93% sin daños. Aunque tanto el intervalo superior como el intermedio mostraron una proporción menor de afectaciones, el intervalo 3 posee el 100% de ausencia de daños (Tabla 7).

Tabla 7. Presencia de daños en la regeneración para los tres intervalos de altitud.

Daños presentes	Intervalo 1		Intervalo 2		Intervalo 3	
	F	Fr (%)	F	Fr (%)	F	Fr (%)
Sin daño	856.00	98.62	554	98.93	848	100.00
Suprimido	12.00	1.38	6.00	1.07	0.00	0.00
Total	868.00	100.00	560.00	100.00	848.00	100.00

F = Frecuencia, Fr = Frecuencia relativa.

Los daños en el arbolado adulto no tienen un comportamiento creciente o descendente respecto al aumento de altitud; el intervalo superior presenta 3.14 veces más daño que el intervalo medio y 1.10 que el inferior. En el intervalo 1, el 96.69% de los árboles del estrato superior no mostraron ningún tipo de afectación, el daño más común fue ocasionado por la supresión con 14 registros, la clase de viento, sequía y actividades humanas a causa de la extracción de árboles, representan en conjunto 1.20% del total de individuos (Tabla 8). El intervalo 2 registró la menor cantidad de afectaciones con siete árboles en la clase de supresión y el 98.96% de los individuos no manifestaron algún tipo de daño. El intervalo 3 es el único que resultó con afectaciones por fuego en cuatro árboles, aunque el daño más frecuente fue la sequía y el viento con ocho individuos para cada clase, no obstante, el 97.25% del estrato arbóreo se consideró como sano.

Tabla 8. Presencia de daños en el arbolado adulto para los tres intervalos de altitud.

Daños presentes	Intervalo 1		Intervalo 2		Intervalo 3	
	F	Fr (%)	F	Fr (%)	F	Fr (%)
Sin daño	642.00	96.69	665	98.96	708	97.25
Suprimido	14.00	2.11	7.00	1.04	0.00	0.00
Viento	4.00	0.60	0.00	0.00	8.00	1.10
Sequía	2.00	0.30	0.00	0.00	8.00	1.10
Actividades humanas	2.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00
Fuego	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00	0.55
Total	664.00	100.00	672.00	100.00	728.00	100.00

F = Frecuencia, Fr = Frecuencia relativa.

DISCUSIÓN

Análisis estructural

La heterogeneidad en la estructura del arbolado es de gran importancia, debido a que permite mayor diversidad al incrementar el espacio de nicho, lo que posibilita que se establezcan más especies (Oettel y Lapin 2021), principalmente aves (Hanle *et al.* 2020) e insectos (Staab *et al.* 2023). Los valores del índice de Pretzsch en los tres intervalos altitudinales no mostraron un comportamiento ascendente o decreciente relacionado con la altura, la distribución de especies en los tres estratos de altura de cada intervalo es de alta homogeneidad, ya que un valor del 100% indica que todos los taxones de la comunidad se distribuyen de manera equitativa (Caballero-Cruz *et al.* 2022). El análisis de la estructura vertical presentó resultados superiores a lo reportado por diversos autores como Graciano-Ávila *et al.* (2020) quienes estudiaron una comunidad con dos tratamientos silvícolas en 10 años (2007 al 2017) durante tres periodos de tiempo, señalan valores de A entre 2.66 a 2.72, A_{max} de 3.87 y A_{rel} de 68 al 70%; al igual Alanís-Rodríguez *et al.* (2020) citan un valor de $A = 2.03$ y $A_{max} = 3.29$ lo que representa una diversidad media en altura para un bosque de galería en una etapa madura sin alteraciones antropogénicas aparentes.

La homogeneidad obtenida para los tres intervalos altitudinales es debido a la conservación de esta área; en el año 2000 se detuvieron las actividades de manejo forestal, lo que ocasionó que algunos árboles de grandes dimensiones alcancen una fase madura con una estructura definida (Willim *et al.* 2022). La distribución de individuos en estratos diferentes favorece que distintas especies tolerantes e intolerantes cohabiten en una comunidad (Sheil y Bongers 2020), por ejemplo, *P. tremuloides* puede cumplir con sus requerimientos de luz (Landhäusser *et al.* 2019) y a su vez coexistir con taxones tolerantes como *A. concolor* y *P. menziesii* que prefieren condiciones frías (Pile *et al.* 2019, Müller-Using *et al.* 2022). La mayor concentración de individuos en los tres intervalos se presentó en los estratos II y III, estos resultados se asemejan a los expuestos por Dávila-Lara *et al.* (2019) en un ejido de San Luis Potosí con manejo a través del método mexicano de ordenación de bosques irregulares y en una Unidad de Manejo Ambiental para la Conservación de la Vida Silvestre al reportar una densidad del 94 al 98% en los estratos de menor altura.

El índice de valor de importancia estuvo dominado principalmente por la familia Pinaceae, debido a que en todos los estratos de cada intervalo la especie de mayor peso ecológico pertenece a esta familia. Las coníferas relicto *A. concolor* y *P. menziesii*, se presentaron como dominantes o codominantes en ocho estratos de altura, estos valores estructurales están relacionados con la protección por su inclusión en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT 2010). Asimismo, *P. arizonica* se clasificó como uno de los taxones de mayor peso ecológico, por causa de su propiciación con el manejo forestal debido al interés comercial que presenta (Morales-Nieto et al. 2021). La alta presencia de esta familia concuerda con las establecidas por Hernández-Salas et al. (2018) en el ejido El Largo y Anexos, en el mismo municipio que la presente investigación, quienes en tres periodos (1986, 1996 y 2006) mencionan a esta familia con un valor de importancia en conjunto del 71 hasta 85%, el incremento en su ponderación en cada década aumentó por las actividades de aprovechamiento maderable que se llevan a cabo desde casi un siglo en el ejido.

La alta distribución de la familia Pinaceae se relaciona a las condiciones ambientales en los bosques de Chihuahua, con clima templado a frío en sitios húmedos y una amplia riqueza de topoformas, aunque *Psuedotsuga* y *Abies* se presenten de forma recluida por sus requerimientos de hábitat definidos, el género *Pinus* tiene una mayor variedad de taxones y capacidad de desarrollo, lo que le permite establecerse en otras áreas e incluso dominar distintas comunidades (Rzedowski 2006).

Diversidad y riqueza

El análisis de diversidad de Shannon-Wiener presentó valores entre 0.30 y 1.60, otros autores reportan resultados similares en bosques templados, como Manzanilla-Quijada et al. (2020) en cuatro sitios en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León, al obtener valores de H' que oscilan entre 1.02 a 1.68 con dominancia por los géneros *Pinus* y *Quercus*, y codominancia del género *Abies* en una localidad. Por otra parte, Molina-Marchan et al. (2024) refieren que los bosques con dominancia o codominancia de *P. menziesii* en general presentan valores inferiores a 2 a nivel nacional. Del mismo modo, Domínguez-Gómez et al. (2018) en tres localidades en Durango intervenidas mediante cortas de selección, señalan valores de H' entre 0.94 a 1.36, y en el ANP de Santa Bárbara zona característica por albergar a *P. menziesii*, *Abies duranguenses* Martínez y *Picea chihuahuana* Martínez reportan el máximo valor de 1.51. De acuerdo con Magurran (2004) los valores inferiores a 2 se consideran como baja diversidad.

El índice de riqueza de Margalef registró en general valores inferiores a uno, los intervalos 1 y 3 poseen la mayor riqueza en el estrato medio de altura, a diferencia del intervalo 2 que mostró un decremento conforme se reducía la categoría de altura. Estas cifras coinciden a las obtenidas por Holguín-Estrada et al. (2021) quienes en un bosque de galería señalan valores de D_{mg} inferiores a 2 a lo largo de un gradiente altitudinal; de acuerdo con Margalef (1972) los valores menores a 2 indican una baja riqueza. Los resultados de riqueza tienen una interpretación semejante a la diversidad, sin embargo, esta evaluación se enfoca especies arbóreas, ya que según Flores-Cavada et al. (2018) en su evaluación de hongos macromicetos, señalan una alta riqueza en el municipio de Madera, principalmente en el ejido Socorro Rivera que colinda con el Santuario.

Cabe señalar, que el reciente decreto como ANP favorece mayor diversidad, al excluirla de distintas actividades antrópicas como la agricultura o la urbanización que generan la destrucción de hábitats (Vergel-Verjel y Almeida-Vieira 2024), debido a que la conservación previene la

fragmentación de parches (Wang *et al.* 2020), especies invasoras y deforestación (Kumari *et al.* 2021), lo que potencialmente aumenta la diversidad de plantas, y a su vez, permite la conservación de otras poblaciones circundantes al ANP (Brodie *et al.* 2023).

Estado actual de la regeneración

Uno de los procesos más importantes que ocurre en ecosistemas forestales es la regeneración de forma natural. Se considera parte fundamental en la conservación de la biodiversidad, servicios ambientales y funcionalidad ecológica (Hammond *et al.* 2021). En general, la abundancia del renuevo en cada intervalo es superior al arbolado mayor, lo que denota una eficiente capacidad de la comunidad para prevalecer. Asimismo, no se presentaron cambios notables en relación con la altitud; esto difiere con García-García *et al.* (2023) quienes señalan mayor capacidad de reclutamiento con el descenso de altitud en la ANP del Cerro Mohinora; no obstante, el análisis de correlación indicó que la altura no incide en la capacidad de regeneración, también reportan una alta capacidad de renuevo del género *Pseudotsuga* y *Abies*, lo que coincide con los resultados obtenidos. *A. concolor* con 2.24 en el intervalo 2 y *P. menziesii* con 2.40 en el intervalo 3, mostraron la mayor proporción de regeneración en la comunidad. Por otra parte, los valores generados difieren con García-García *et al.* (2020) en un bosque templado de Chihuahua excluido de actividades forestales, debido a que citan a *P. menziesii* como especie dominante del estrato arbóreo, aunque presentó una menor proporción de regeneración ($N\ ha^{-1}$), a diferencia de *Abies durangensis*, que obtuvo una abundancia mayor de renuevo.

La favorable proporción de las coníferas relicto se considera como un indicador positivo debido a que si el bosque se encuentra en un equilibrio relativo las coníferas tolerantes como *A. concolor* comienzan a desarrollarse (Bartos y Campbell 1998, Shepperd *et al.* 2006) e incluso pueden dominar a otras en rodales mixtos, como a especies heliófilas de los géneros *Pinus*, *Quercus* y *Juniperus* (Novák *et al.* 2019) que no logran cumplir con sus requerimientos de luz (Silver *et al.* 2013). Otro de los taxones de gran relevancia presente en el ANP es *Populus tremuloides*. Esta es la angiosperma de mayor distribución en Norteamérica (Goessen *et al.* 2022), se considera indicadora de disturbio, debido a que se establece en una etapa de sucesión temprana como ocurre posterior a un incendio (Kreider y Yocom 2021).

De acuerdo con CONANP (2023) a nivel localidad, la Cotorra Serrana Occidental (*Rhynchopsitta pachyrhyncha* (Swainson, 1827)) anida principalmente en esta especie arbórea, sin embargo, en los tres intervalos de altura presentó la menor proporción entre renuevo y arbolado, lo que indica que la comunidad puede estar en una etapa de sucesión en la que surge un intercambio de especies pioneras.

La composición actual indica que el bosque se ha mantenido estable a factores de impacto en el periodo reciente; de igual manera, la alta capacidad de reclutamiento de las especies sujetas a protección especial presentes en el santuario reafirma la importancia conservar el área y potencialmente establecer y promover estrategias para aumentar sus poblaciones, así como implementar técnicas de manejo forestal en zonas estratégicas que favorezcan la captación de luz para el desarrollo de *Populus tremuloides*, debido a que el incremento energético genera una relación positiva con el aumento de densidad y volumen (Deighton *et al.* 2021), esto con el fin de preservar el hábitat principal de la Cotorra Serrana, especie bandera del área que se encuentra en peligro de extinción.

Daño en el renuevo y arbolado adulto

Las alteraciones naturales o antropogénicas pueden modificar la capacidad de regeneración de las especies arbóreas, no obstante, el único tipo de daño presente en el renuevo es la supresión, incluso cuando el bosque presenta una menor densidad de renuevo en comparación a las descritas por otros autores como Luna-Robles *et al.* (2020), Flores-Rodríguez *et al.* (2021) y Frei *et al.* (2022) en comunidades con mayor competencia. Aunque la proporción de individuos suprimidos presentó bajos valores, se podría reducir mediante intervenciones silvícolas como los aclareos para redistribuir el crecimiento de la vegetación y evitar una sobre competencia por nutrimentos (Depauw *et al.* 2019), además, de generar una mayor diversidad y desarrollo de los árboles remanentes (Wang *et al.* 2021).

El registro de daños del ANP resultó con una mejor salud del bosque en comparación a lo referido en el Inventario Estatal Forestal y de Suelos (IEFyS) para el año 2013 (CONAFOR 2014) en el municipio de Madera, debido a que se presentó el 8.80% del renuevo con afectaciones, principalmente a causa de insectos, incendios y factores antropogénicos. De forma similar, el santuario tiene un mejor estado que lo señalado por Flores *et al.* (2018) en varias zonas forestales en Jalisco, quienes obtuvieron el 58% de individuos sin daño en la categoría de 0 - 0.30 m, 33% en la clase de 0.31 - 1 m y 5% de 1.01 - 3 m, principalmente con daños por plagas y ramoneo. En los tres intervalos de altura el arbolado superior registró una mayor cantidad y tipos de afectaciones en comparación con el renuevo, no obstante, la cantidad de individuos sin daños en cada intervalo oscila entre 96.69 a 98.96%, este análisis muestra un mejor estado del bosque en comparación con lo indicado por Zaragoza-Hernández *et al.* (2015), ya que señalan resultados inferiores al 70% de árboles sanos en tres parques urbanos de la Ciudad de México, en su mayoría afectados por plantas parasitas y vandalismo.

Los principales daños presentes en el ANP fueron: supresión, viento y sequía, con un total de 43 árboles afectados, el menor tipo de daño es el antropogénico y el fuego; a nivel nacional cerca del 98% de los incendios es ocasionado por el ser humano (CONAFOR 2023), y su baja frecuencia en el periodo actual del Santuario se debe en gran medida a las brigadas contra incendios con operaciones de protección y prevención, a través de brechas cortafuego y remoción de combustibles, lo que evita la propagación de enfermedades y plagas secundarias, principalmente de los escarabajos descortezadores que perteneces a los géneros *Ips* (C. DeGeer, 1775) y *Dendroctonus* (W. F. Erichson, 1836) que se benefician de distintos factores de disturbios (Fettig *et al.* 2022).

CONCLUSIONES

Los tres intervalos exhibieron homogeneidad dentro de su estructura vertical. El estrato II de cada intervalo tuvo el mayor valor del índice de Margalef y de Shannon. Las especies pertenecientes a la familia Pinaceae fueron las dominantes y codominantes en todos los estratos, lo que se relaciona con las condiciones presentes del ANP que favorece el desarrollo de especies adaptadas a ecosistemas fríos como *Abies concolor*, *P. menziesii* y *P. strobiformis*. *P. arizonica* tiene un gran peso ecológico, por ser uno de los taxones más abundantes a nivel estado y por las actividades de manejo forestal que se realizan en la región. Todas las especies arbóreas que se

encuentran en la NOM-059-SEMARNAT-2010 presentaron los mayores valores de regeneración, pero *P. tremuloides* tiene baja proporción de renuevo, por lo que se requieren actividades que favorezcan y aumenten su población. El registro de daños sirve como indicador de la salud actual del bosque, los bajos valores, principalmente generados por el ser humano, resaltan la importancia de establecer áreas para conservación, en las que se realice monitoreo y actividades de prevención constante para evitar y resolver problemáticas que puedan generar alteraciones negativas en el equilibrio del bosque.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada al primer autor para el estudio de la maestría en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. De igual forma, al personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y la Comisión Nacional Forestal en Madera por su apoyo en las actividades de campo. Asimismo, los autores expresan agradecimiento a los distintos revisores por las observaciones y contribuciones realizadas, debido a que permitieron mejorar la calidad de la investigación.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Alanís-Rodríguez E, Rubio-Camacho EA, Canizales-Velázquez PA, Mora-Olivo A, Pequeño-Ledezma MÁ, Buendía-Rodríguez E (2020) Estructura y diversidad de un bosque de galería en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(58): 134-153. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.591>
- Bartos DL, Campbell RB Jr (1998) Decline of quaking aspen in the interior west-examples from Utah. *Rangelands* 20: 17-24. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/24823>. Fecha de consulta: Consultado el 28 de enero de 2024.
- Bodo T, Gimah BG, Seomoni KJ (2021) Deforestation and habitat loss: Human causes, consequences and possible solutions. *Journal of Geographical Research* 4(2): 22-30. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i2.3059>
- Brodie JF, Mohd-Azlan J, Chen C, Wearn OR, Deith MCM, Ball JGC, Slade EM, Burslem DFRP, Teoh SW, Williams PJ, Nguyen A, Moore JH, Goetz SJ, Burns P, Jantz P, Hakkenberg CR, Kaszta ŻM, Cushman S, Coomes D, Helmy OE, Reynolds G, Rodríguez JP, Jetz W, Scott-Luskin M (2023) Landscape-scale benefits of protected areas for tropical biodiversity. *Nature* 620(7975): 807-812. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06410-z>
- Caballero-Cruz P, Treviño-Garza EJ, Mata-Balderas JM, Alanís-Rodríguez E, Yerena-Yamallel JI, Cuéllar-Rodríguez LG (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). <https://doi.org/doi:10.29298/rmcf.v13i71.1253>
- CONANP (2023) Estudio previo justificativo para el establecimiento del Área Natural Protegida Santuario Cotorra Serrana. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Chihuahua, México. 242p.
- CONAGUA (2023) Normales Climatológicas por Estado. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chih>. Fecha de consulta: 12 de septiembre de 2023.

- CONAFOR (2014) Inventario estatal forestal y de suelos – Chihuahua. Comisión Nacional Forestal. https://transparencia.cnf.gob.mx/filesconafor/userfiles/IEFYs/IEFYs_Chihuahua_2013/IEFYs_Chihuahua_2013.pdf. Fecha de consulta: 12 de septiembre de 2023.
- CONAFOR (2017) Inventario nacional forestal y de suelos. Procedimientos de muestreo. Zapopan, Jal., México: Comisión Nacional Forestal. Fecha de consulta: 6 de diciembre de 2023.
- CONAFOR (2023) Estado que guarda el sector forestal en México. Bosques para el bienestar social y climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jal., México. 524p.
- Curtis JT, McIntosh RP (1951) Un continuo de bosque de tierras altas en la región fronteriza entre praderas y bosques de Wisconsin. *Ecología* 32(3): 476-496.
- Dávila-Lara MA, Aguirre-Calderón ÓA, Jurado-Ybarra E, Treviño-Garza E, González-Tagle MA, y Trincado-Villagrán GF (2019) Estructura y diversidad de especies arbóreas en bosques templados de San Luis Potosí, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 6(18). <https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2112>
- Deighton HD, Groot A, Thiffault N, Rice M (2021) Twenty-six years of aspen regeneration under varying light conditions in a boreal mixedwood forest. *Forestry Chronicle*, 97(3): 326-342. <https://doi.org/10.5558/tfc2021-034>
- Depauw L, Perring MP, Brunet J, Maes SL, Blondeel H, De Lombaerde E, De Groot R, Verheyen K (2019) Interactive effects of past land use and recent forest management on the understorey community in temperate oak forests in South Sweden. *Journal of Vegetation Science* 30(5): 917-928. <https://doi.org/10.1111/jvs.12770>
- Domínguez-Gómez TG, Hernández-González BN, González-Rodríguez H, Cantú-Silva I, Alanís-Rodríguez E, Alvarado MS (2018) Estructura y composición de la vegetación en cuatro sitios de la Sierra Madre Occidental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(50). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.227>
- Fettig CJ, Runyon JB, Homicz CS, James PMA, Ulyshen MD (2022) Fire and insect interactions in north American forests. *Current Forestry Reports* 8(4): 301-316. <https://doi.org/10.1007/s40725-022-00170-1>
- Flores-Cavada E, Carrillo-Parra A, Wehenkel CA, Garza-Ocañas F, Hernández-Díaz JC (2018) Diversidad de macromicetos en bosques de pino en el municipio Madera, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(50): 342-360. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.240>
- Flores GJG, Flores RAG, Lomelí ZME, Ruiz GE, García BJM (2018) Caracterización de la regeneración en áreas impactadas por incendios forestales del estado de Jalisco. Folleto Técnico. Núm. 1 INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, México. 65p.
- Flores-Rodríguez AG, Flores-Garnica JG, González-Eguiarte DR, Gallegos-Rodríguez A, Zarazúa-Villaseñor P, Mena-Munguía S, Lomelí-Zavala ME, Ruiz-Guzmán E (2021) Regeneración natural de pino y encino bajo diferentes niveles de perturbación por incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(65). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.776>
- Frei ER, Moser B, Wohlgemuth T (2022) Competitive ability of natural Douglas fir regeneration in central European close-to-nature forests. *Forest Ecology And Management* 503: 119767. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119767>
- García-García SA, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón ÓA, Treviño-Garza EJ, Cuéllar-Rodríguez LG, Chávez-Cost AC (2023) Composición, estructura y estado de la regeneración arbórea en un gradiente altitudinal en un bosque templado de Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Polibotánica* (56): 81-100. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.56.5>
- García-García SA, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón ÓA, Treviño-Garza EJ, Graciano-Ávila 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>
- Goessen R, Isabel N, Wehenkel C, Pavy N, Tischenko L, Touchette L, Giguère I, Gros-Louis M, Laroche J, Boyle B, Soolanayakanahally R, Mock KE, Hernández-Velasco J, Simental-Rodríguez S, Bousquet J, Porth I (2022) Coping with environmental constraints: Geographically divergent adaptive evolution and germination plasticity in the transcontinental *Populus tremuloides*. *Plants, People, Planet* 4(6): 638-654. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10297>
- Gómez-Pineda E, Hammond WM, Trejo-Ramírez O, Gil-Fernández M, Allen CD, Blanco-García A, Sáenz-Romero C (2022) Drought years promote bark beetle outbreaks in Mexican forests of *Abies religiosa* and *Pinus pseudostrobus*. *Forest Ecology and Management* 505: 119944. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119944>

- González-Fernández A, Segarra J, Sunny A, Couturier S (2022) Forest cover loss in the Nevado de Toluca volcano protected area (Mexico) after the change to a less restrictive category in 2013. *Biodiversity and Conservation* 31(3): 87-894. <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02368-y>
- González-Gaona E, Gómez-Nísino A, De Lira-Ramos KV, Rodríguez-Cruz YE, Olivo-Martínez JA, Rascón-Mendoza AA, Sánchez-Martínez G (2021) Primer registro documentado de *Neodiprion abietis* (Harris, 1841) (Hymenoptera: Diprionidae) para México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(64): 115-126. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.837>
- Graciano-Ávila G, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón ÓA, González-Tagle MA, Treviño-Garza EJ, Mora-Olivo A, Corral-Rivas JJ (2020) Cambios estructurales de la vegetación arbórea en un bosque templado de Durango, México. *Acta botánica mexicana* (127). <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1522>
- Hammond ME, Pokorný R, Okae-Anti D, Gyedu A, Obeng IO (2021) The composition and diversity of natural regeneration of tree species in gaps under different intensities of forest disturbance. *Journal of Forestry Research* 32(5): 1843-1853. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01269-6>
- Hanle J, Duguid MC, Ashton MS (2020) Legacy forest structure increases bird diversity and abundance in aging young forests. *Ecology and Evolution* 10(3): 1193-1208. <https://doi.org/doi:10.1002/ece3.5967>
- Hernández-Salas J, Aguirre-Calderón ÓA, Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Pérez J, Treviño-Garza EJ, González-Tagle MA, Luján-Álvarez C, Olivas-García JM, Domínguez-Pereda LA (2018) Dinámica del crecimiento de un bosque templado bajo manejo en el noroeste de México. *Madera y Bosques* 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421767>
- Holguín-Estrada VA, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón ÓA, Yerena-Yamallel JI, Pequeño-Ledezma MA (2021) Estructura vertical de un bosque de galería en un gradiente altitudinal en el noroeste de México. *Polibotánica* 51: 55-71. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.51.4>
- INEGI (2021) Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. Fecha de consulta: 7 de septiembre de 2023.
- Koutecký T, Ujházy K, Volařík D, Ujházyová M, Máliš F, Gömöryová E, Bače R, Ehrenbergerová L, Glončák P, Hofmeister J, Homolák M, Janda P, Koutecká V, Koutecký P, Lvončík S, Mikoláš M, Svoboda M (2022) Disturbance history drives current compositional and diversity patterns of primary *Picea abies* (L.) Karst. forest vegetation. *Forest Ecology and Management* 520, 120387. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120387>
- Kreider MR, Yocom LL (2021) Low-density aspen seedling establishment is widespread following recent wildfires in the western United States. *Ecology* 102(10): e03436. <https://doi.org/10.1002/ecy.3436>
- Kumari R, Deepali A, Bhatnagar S (2021) Biodiversity loss: Threats and conservation strategies. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research* 68(1). <https://doi.org/10.47583/ijpsrr.2021.v68i01.037>
- Landhäuser SM, Pinno BD, Mock KE (2019) Tamm review: Seedling-based ecology, management, and restoration in aspen (*Populus tremuloides*). *Forest Ecology and Management* 432: 231-245. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.024>
- Ledig FT, Mápula LM, Bermejo VB, Reyes HV, Flores LC, Capo A MA (2000) Locations of endangered spruce populations in México and the demography of *Picea chihuahuana*. *Madroño* 47(2): 71-88.
- Liu D, Guo Z, Cui X, Fan C (2023) Estimation of the population dynamics of *Taxus cuspidata* by using a static life table for its conservation. *Forests* 14(11): 2194. <https://doi.org/10.3390/f14112194>
- Luna-Robles EO, Cantú-Silva I, Yáñez-Díaz MI (2020) Efectos del manejo forestal en la composición y diversidad de la regeneración natural arbórea en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Polibotánica* (50): 19-30. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.50.2>
- Magurran AE (2004) *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Science Ltd, a Blackwell Publishing company. Uk. 256p.
- Manzanilla-Quijada GE, Mata-Balderas JM, Treviño-Garza EJ, Aguirre-Calderón ÓA, Alanís-Rodríguez E, Yerena-Yamallel JI (2020) Diversidad, estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(61). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.703>
- Margalef R (1972) Homage to Evelyn Hutchinson, or why is there an upper limit to diversity. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 44: 211-235.
- Martínez-Calderón VM, Sosa-Ramírez J, Siqueiros-Delgado ME, 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* (128). <https://doi.org/10.21829/abm128.2021.1829>

- Martínez-Méndez N, Aguirre-Planter E, Eguiarte LE, Jaramillo-Correa JP (2016) Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences* 94(1): 5-24. <https://doi.org/10.17129/botsci.508>
- Molina-Marchan E, Narváez-Flores R, Mojica-Guerrero AS (2024) Estructura horizontal y diversidad de los bosques de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco en México. *Polibotánica* (57). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.57.4>
- Morales-Nieto CR, Siqueiros-Candia M, Álvarez-Holguín A, Gil-Vega KC, Corrales-Lerma R, Martínez-Salvador M (2021) Diversidad, estructura genética e hibridación en poblaciones de *Pinus arizonica* y *P. durangensis*. *Madera y bosques* 27(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722170>
- Müller-Using S, Müller-Using B, Petersen R (2022) Evaluación Silvícola de Bosques seminaturales de Roble y Pino Oregón. *Ciencia & Investigación Forestal* 28(2): 33-45. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.563>
- Nelson KN, O'Dean E, Knapp EE, Parker A, Bisbing SM (2021) Persistent yet vulnerable: resurvey of an *Abies* ecotone reveals few differences but vulnerability to climate change. *Ecology* 102(12). <https://doi.org/10.1002/ecy.3525>
- Noulèkoun F, Birhane E, Mensah S, Kassa H, Berhe A, Gebremichael ZM, Adem NM, Seyoum Y, Mengistu T, Lemma B, Hagazi N, Abrha H (2021) Structural diversity consistently mediates species richness effects on aboveground carbon along altitudinal gradients in northern Ethiopian grazing exclosures. *Science of the Total Environment* 776: 145838. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145838>
- Novák J, Roleček J, Dresler P, Hájek M (2019) Soil charcoal elucidates the role of humans in the development of landscape of extreme biodiversity. *Land Degradation and Development* 30(13): 1607-1619. <https://doi.org/10.1002/ldr.3350>
- Nunes LJR (2023) Effects of climate change on temperate forests in the Northwest Iberian Peninsula. *Climate* 11(8): 173. <https://doi.org/10.3390/cli11080173>
- Oettel J, Lapin K (2021) Linking forest management and biodiversity indicators to strengthen sustainable forest management in Europe. *Ecological Indicators* 122: 107275. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107275>
- Ouyang S, Xiang W, Gou M, Chen L, Lei P, Xiao W, Deng X, Zeng L, Li J, Zhang T, Peng C, Forrester DI (2020) Stability in subtropical forests: The role of tree species diversity, stand structure, environmental and socio-economic conditions. *Global Ecology and Biogeography* 30(2): 500-513. <https://doi.org/10.1111/geb.13235>
- Pile LS, Meyer MD, Rojas R, Roe O, Smith MT (2019) Drought impacts and compounding mortality on forest trees in the Southern Sierra Nevada. *Forests* 10(3): 237. <https://doi.org/10.3390/f10030237>
- Pretzsch H (2009) *Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model.* Springer. Heidelberg. Berlin. 664p.
- R Core Team (2020) *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 19 de febrero de 2024.
- Requena-Lara GN, Ochoa-Sandoval PE, Morales-Pacheco JF, Garza-Torres HA, Zamora-Tovar C, González-Romo CE, Guerra-Pérez A, Manzano-Banda JI, Treviño-Carreón (2020) Distribución y condiciones ecogeográficas del bosque relicto de *Abies* en zonas montañosas de Tamaulipas. *Polibotanica* (49). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.49.4>
- Rzedowski J (1978) *Vegetación de México.* Ed. Limusa. México. 432p.
- Rzedowski J (2006) *Vegetación de México. 1a. Edición digital.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504p.
- Sánchez-Pinillos M, Dakos V, Kéfi S (2024) Ecological dynamic regimes: A key concept for assessing ecological resilience. *Biological Conservation* 289: 110409. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110409>
- SEMARNAT (2010) Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestre-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, 2da Sección, jueves 30 de diciembre de 2010, México.
- Semerikova SA, Khrunyk YY, Lascoux M, Semerikov VL (2018) From America to Eurasia: a multigenomes history of the genus *Abies*. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 125: 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2018.03.009>
- Senf C, Mori AS, Müller J, Seidl R (2020) The response of canopy height diversity to natural disturbances in two temperate forest landscapes. *Landscape Ecology*, 35(9); 2101-2112. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01085-7>

- Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal 27(3): 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Sharma A, Patel SK, Singh GS (2023) Variation in Species Composition, Structural Diversity, and Regeneration Along Disturbances in Tropical Dry Forest of Northern India. Journal of Asia-Pacific Biodiversity 16(1): 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2022.11.004>
- Sheil D, Bongers F (2020) Interpreting forest diversity-productivity relationships: volume values, disturbance histories and alternative inferences. Forest Ecosystems 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40663-020-0215-x>
- Shepperd WD, Rogers PC, Burton D, Bartos DL (2006) Ecology, biodiversity, management, and restoration of aspen in the Sierra Nevada. US Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-178. US Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO, US. 122p.
- Silver E, D'Amato AW, Fraver S, Palik BJ, Bradford JB (2013) Structure and development of old-growth, unmanaged second-growth, and extended rotation *Pinus resinosa* forests in Minnesota, USA. Forest Ecology and Management 291: 110-118: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.033>
- Staab M, Gossner MM, Simons NK, Achury R, Ambarli D, Bae S, Schall P, Weisser WW, Blüthgen N (2023) Insect decline in forests depends on species' traits and may be mitigated by management. Communications Biology 6(1): 338. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-04690-9>
- Ullah F, Gilan H, Sanaei A, Hussain K, Ali A (2021) Stand structure determines aboveground biomass across temperate forest types and species mixture along a local-scale elevational gradient. Forest Ecology and Management 486: 118984. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118984>
- Vergel-Vergel MC, Almeida-Vieira T (2024) Agriculture in protected areas of Latin America: News website review. Sustainability 16(3): 1026. <https://doi.org/10.3390/su16031026>
- Wang G, Sun Y, Zhou M, Guan N, Wang Y, Jiang R, Liu Z, Wu M, Xia F (2021) Effect of thinning intensity on understory herbaceous diversity and biomass in mixed coniferous and broad-leaved forests of Changbai Mountain. Forest Ecosystems/Forest Ecosystems 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00331-x>
- Wang Y, Brandt M, Zhao M, Xing K, Wang L, Tong X, Xue F, Kang M, Jiang Y, Fensholt R (2020) Do afforestation projects increase core forests? Evidence from the Chinese Loess Plateau. Ecological Indicators 117: 106558. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106558>
- Willim K, Ammer C, Seidel D, Annighöfer P, Schmucker J, Schall P, Ehbrecht M (2022) Short - term dynamics of structural complexity in differently managed and unmanaged European beech forests. Trees, Forests and People 8: 100231. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100231>
- Zaragoza-Hernández AY, Cetina-Alcalá VM, López-López MÁ, Chacalo-Hilú A, de la Isla-de Bauer MD, Alvarado-Rosales D, González-Rosas H (2015) Identificación de daños en el arbolado de tres parques del Distrito Federal. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6(32): 63-82. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i32.99>
- Zhang QP, Wang J, Wang Q (2021) Effects of abiotic factors on plant diversity and species distribution of alpine meadow plants. Ecological Informatics 61: 101210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101210>