



Estructura y composición del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en su distribución altitudinal en el Nevado de Toluca

Pinus hartwegii Lindl. forest, structure and composition along of its elevational distribution in the *Nevado of Toluca*

Griselda Chávez-Aguilar¹, Gisela Virginia Campos-Ángeles², Marlín Pérez-Suárez^{3*}

Fecha de recepción/Reception date: 23 de febrero de 2022

Fecha de aceptación/Acceptance date: 29 de septiembre de 2022

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Agricultura Familiar, INIFAP. México.

²División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. México.

³Instituto de Ciencias Rurales y Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Campus El Cerrillo. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: mperezs@uaemex.mx, marpersua@gmail.com

*Corresponding author; e-mail: mperezs@uaemex.mx, marpersua@gmail.com

Resumen

Conocer la estructura y composición de un bosque, permite entender los atributos dasométricos de los árboles y los procesos ecosistémicos a lo largo de gradientes de vegetación derivados de la altitud. Se analizó la estructura del bosque de *Pinus hartwegii* en un gradiente de 600 m en el Nevado de Toluca. Se establecieron conglomerados de 1 ha en cada altitud y se registraron variables dasométricas. La estructura vertical y horizontal se evaluó con la densidad arbórea (*DA*), área basal (*AB*) y parámetros e índices estructurales. Estos últimos mostraron que *P. hartwegii* mantiene su abundancia y dominancia a lo largo del gradiente altitudinal estudiado, principalmente de los 3 700 a 4 000 m donde forma bosques monoespecíficos. La contribución en la estructura arbórea disminuyó de 100 % a 3 900 y 4 000 m, a 45 % en los 3 500 m. Los parámetros dasométricos indicaron mayor *DA* en individuos de clases diamétricas de 5-15 cm, y fue superior por debajo de los 3 800 m; ello evidenció que la regeneración puede ser más limitada a grandes altitudes, posiblemente debido a una extracción irregular del arbolado. Se concluye que la composición estructural del bosque de *P. hartwegii* presenta un cambio importante en su estructura de acuerdo con la altitud, lo que resultaría de la interacción ambiente-sociedad mediante la gestión del uso del suelo asociada a la altitud, y que compromete la estructura y función del ecosistema. Se recomienda incorporar la altitud como una variable determinante en planes de manejo para bosques de alta montaña.

Palabras clave: Altitud, bosques templados, composición arbórea, densidad arbórea, procesos ecosistémicos, valor de importancia ecológica.

Abstract

Knowledge of the structure and composition of a forest makes it possible to understand the dasometric attributes of trees and ecosystem processes along altitude-derived vegetation gradients. The structure of the *Pinus hartwegii* forest was analyzed at an altitude of 600 m on the *Nevado of Toluca*. Clusters of 1 ha were established at each altitude; dasometric variables were registered. The vertical and horizontal structure was assessed based on the tree density (*TD*), basal area (*BA*), and structural parameters and indices. The latter

showed that *P. hartwegii* maintains its abundance and dominance along the studied altitudinal gradient, mainly between 3 700 and 4 000 m, where it forms monospecific forests. The contribution to the tree structure decreased from 100 % at 3 900 and 4 000 m to 45 % at 3 500 m. The dasometric parameters indicated a higher *TD* in individuals in diameter classes of 5–15 cm at altitudes below 3 800 m; this showed that regeneration may be more limited at higher altitudes, possibly due to irregular tree removal. We conclude that the structural composition of the *P. hartwegii* forest shows an important change in its structure depending on the altitude, as a result of the environment-society interaction through altitude-related land use management, which compromises the structure and function of this ecosystem. We recommend incorporating altitude as a decisive variable in management plans for high-mountain forests.

Keywords: Altitude, temperate forests, tree composition, tree density, ecosystem processes, ecological importance value.

Introducción

La disposición tridimensional (3D) de los elementos vegetales en un ecosistema forestal, depende de la combinación de variables climáticas, topográficas e hidrológicas, entre otras, que generan gran heterogeneidad estructural (tamaño, forma y distribución espacial) (Gadow *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2017). Sin embargo, también se generan patrones en parches de vegetación a través del paisaje y que pueden ser útiles como indicadores de la estabilidad e integridad del bosque para funcionar y proveer múltiples servicios ecosistémicos (captura de carbono, captación y purificación de agua, regulación del clima, etcétera) (McElhinny *et al.*, 2005; Gadow *et al.*, 2012; Seidler, 2017).

La estructura del bosque es dinámica y se modifica constantemente mientras los árboles crecen, a través de los procesos de asignación primaria que promueven el incremento en diámetro, altura y biomasa en general (Gadow *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2020) y en función de las condiciones ambientales dominantes. Los cambios en la estructura son adjudicados, en general, a la interacción de las variaciones ambientales y la influencia de la historia de uso de la tierra (Báez *et al.*, 2015) que incluyen disturbios por tala, extracción selectiva de árboles, o bien, la cosecha en el caso de plantaciones forestales (Gadow *et al.*, 2012).

Uno de los indicadores más evidentes de disturbio de la estructura de un bosque, es el establecimiento de diferentes tipos de vegetación como arbustos y herbáceas (Báez y Collins, 2008; Waddell *et al.*, 2020). Esto, en combinación con las funciones del hábitat, crecimiento y estabilidad del ecosistema, principales procesos subyacentes, contribuyen a la

caracterización de un sitio y de los patrones de prácticas pasadas de uso de la tierra que permiten conocer el tipo de disturbio (Gadow *et al.*, 2012).

Las zonas de montaña, son sitios de gran importancia ecológica, bajo distintos contextos ambientales (Körner y Paulsen, 2004; Ramírez-Huerta *et al.*, 2016). Son sitios caracterizados por presentar, en su mayoría, cambios ambientales significativos en cortas distancias conforme se asciende en altitud (Körner y Paulsen, 2004; Bhutia *et al.*, 2019). La estructura, densidad arbórea y área basal, son indicadores de los cambios y estabilidad del bosque (Gadow *et al.*, 2012). Se han citado incrementos en la densidad arbórea y área basal en altitudes medias de bosques andinos (Unger *et al.*, 2012), con decrementos posteriores (Homeier *et al.*, 2010), o sin efecto aparente (Girardin *et al.*, 2010).

En México, gran parte de las zonas de montaña se han incorporado a áreas naturales protegidas (Ramírez-Huerta *et al.*, 2016), las cuales han estado sujetas a fuertes presiones antrópicas derivadas de la expansión urbana y la extracción selectiva del arbolado (Regil *et al.*, 2014; Gómez y Villalobos, 2020), con la consecuente fragmentación del hábitat, la cobertura y la diversidad forestal (Durán-Medina *et al.*, 2005).

Pinus hartwegii Lindl. es una especie forestal dominante en las montañas mexicanas que se distribuye en un gradiente altitudinal de 2 800 a 4 300 m (línea alpina en México) (Farjon *et al.*, 1997). A partir de los 3 000 m forma bosques subalpinos puros (Manzanilla-Quiñones *et al.*, 2019); tiene gran valor ecológico, particularmente, por su adaptación a las bajas temperaturas que dominan a grandes altitudes, así como un alto valor maderable, por lo que ha sido explotada con fines comerciales, lo cual ha originado gran impacto en la extensión y funcionamiento de sus bosques (Franco *et al.*, 2006; Endara *et al.*, 2012; Pérez-Suárez *et al.*, 2022).

El Nevado de Toluca, Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) del Nevado de Toluca, es un área que, protegida por más de 50 años, presenta una zonificación basada en ordenar el territorio de acuerdo con las diferentes condiciones ambientales, físicas, económicas y sociales prevalecientes (Granados *et al.*, 2018). Lo anterior, aunado a un modelo de conservación participativa con permiso legal para realizar diversas actividades económicas

como la ganadería, agricultura, la explotación de los recursos naturales, el turismo y la extracción selectiva de árboles. Estas actividades disminuyen de manera implícita en relación con el gradiente altitudinal; es decir, conforme se acerca a las zonas de amortiguamiento y núcleo (cercanas al cono volcánico), la superficie es de uso restringido o protegido (Semarnat, 2016). Sin embargo, ni la zonificación, ni las actividades económicas permisibles están planeadas de acuerdo con la altitud (Granados *et al.*, 2018), no obstante que esta determina la distribución, funcionamiento y accesibilidad de los bosques. Por lo tanto, si los bosques de *P. hartwegii* están sometidos a una presión antrópica mayor a la permitida (solo actividades económicas de bajo impacto), entonces presentará diferencial en su estructura y composición en función de la altitud.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la estructura y composición del bosque de *P. hartwegii* en un gradiente altitudinal de 600 m en el APFF del Nevado de Toluca, bajo la expectativa de que la información generada sirva como base para entender el funcionamiento del bosque y su resiliencia ante diferentes factores de cambio global.

Materiales y Métodos

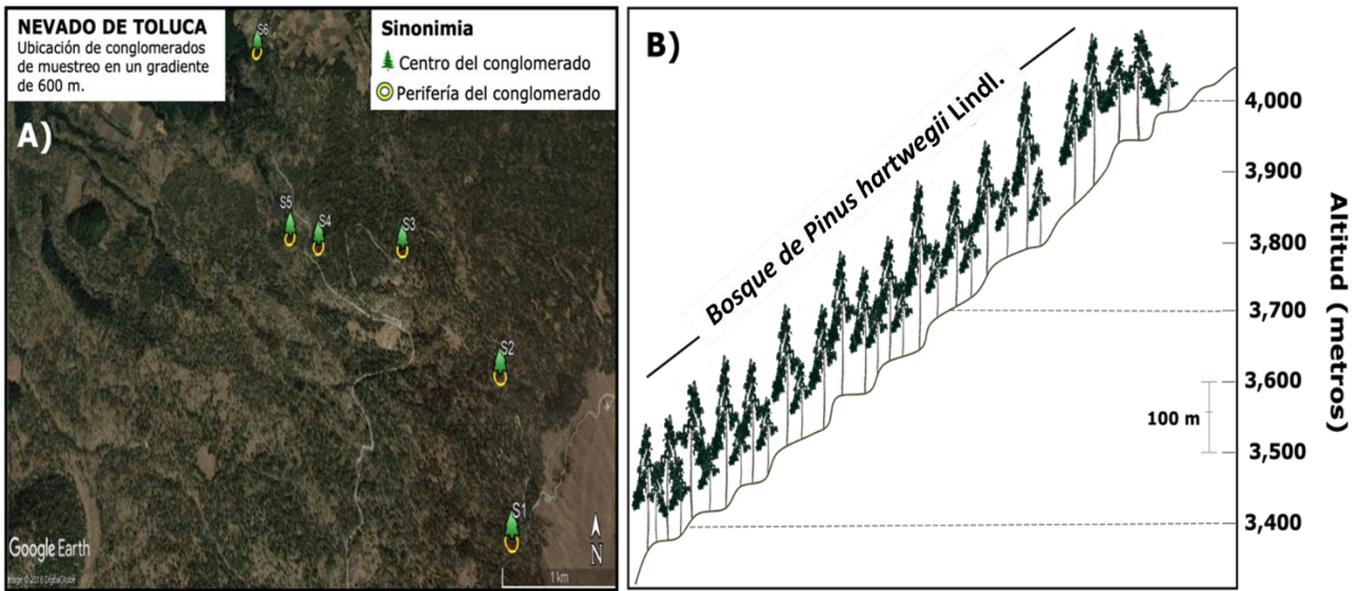
Área de estudio

El estudio se realizó en el APFF del Nevado de Toluca en el Estado de México, localizada entre los valles de Toluca y Tenango, en un intervalo altitudinal de 3 000 a 4 680 m (Körner y Paulsen, 2004). El clima predominante es frío, con las variantes semifrío-subhúmedo C(E)wig y frío E(T)Hwig, y una oscilación en la temperatura media anual de -2 °C a 7 °C (García, 2004). La región presenta un comportamiento isotérmico y la temperatura más alta ocurre antes del solsticio de verano. Aun cuando hay eventos de precipitación en cualquier época del año, la temporada de lluvias es de mayo a octubre, y julio el mes más lluvioso; la precipitación media varía de 200 a 1 800 mm, con caída de nieve de diciembre a febrero (Challenger y Soberón, 2008).

El tipo de suelo en 90 % del área es Andosol y en menor proporción es Feozem, Regosol, Cambisol y Litosol (Körner y Paulsen, 2004). El APFF del Nevado de Toluca constituye un área biogeográfica importante a nivel nacional, ya que alberga bosques templados de pino (*Pinus* spp.), abetos (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.) y encinos (*Quercus* sp.) situados entre 3 000 y 4 100 m de altitud. De los 3 500 a 4 000 msnm, particularmente domina el bosque de *P. hartwegii* (Challenger y Soberón, 2008), mientras que entre 4 100 y 4 500 msnm, domina el pastizal de alta montaña representado mayormente por los géneros *Festuca* y *Calamagrostis* (Calderón de Rzedowski y Rzedowski, 2010).

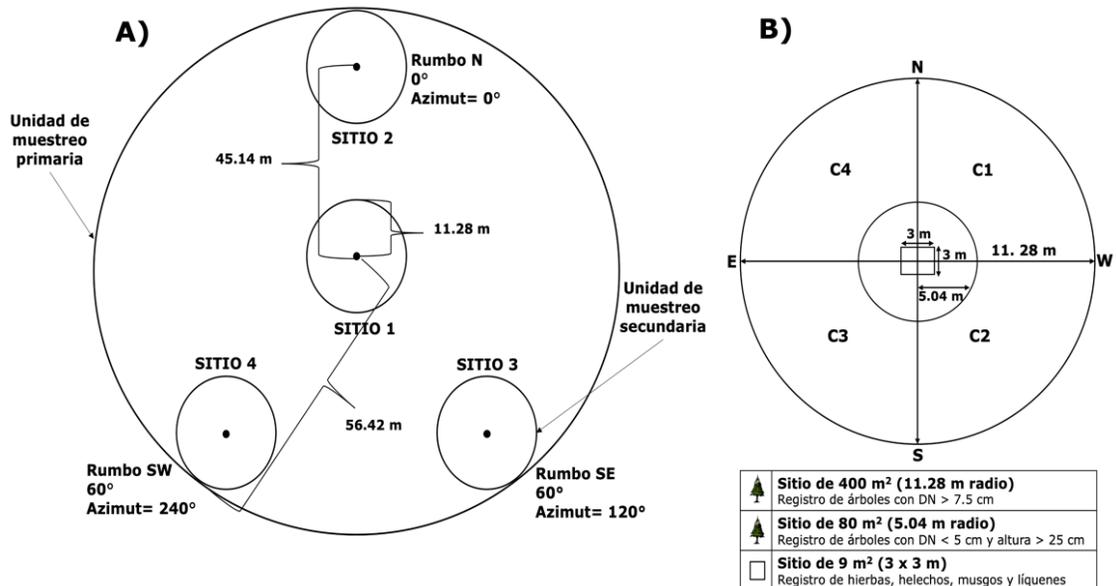
Caracterización de la estructura arbórea

Para caracterizar la estructura arbórea en el APFF del Nevado de Toluca a lo largo de un gradiente altitudinal del bosque de *P. hartwegii*, se estableció una cota altitudinal de 600 m (3 400-4 000 m) mediante imágenes de satélite y curvas de nivel (Figura 1A). A lo largo de dicho gradiente, se establecieron seis sitios de muestreo permanente (SMP) a cada 100 m, similares a los del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) (Figura 1B), el cual se basa en un muestreo estratificado sistemático (Figura 2). Cada SMP consistió en un conglomerado circular de 1 ha (56.42 m de radio) (Figura 2A), el cual se integró por cuatro sitios de muestreo secundarios (SMS) de 400 m² (11.28 m de radio) dispuestos geométricamente en forma de "Y" invertida con respecto al norte (Conafor, 2012).



A) S1 corresponde a la menor altitud (3 400 m) muestreada, y S6 a la mayor (4 000 m). B) Esquema vertical del gradiente altitudinal muestreado (Elaboración propia).

Figura 1. Gradiente altitudinal donde se localizan los sitios de muestreo permanentes para caracterizar la estructura del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en el APFF Nevado de Toluca.



A) sitios circulares similares a los establecidos por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos, y B) sitios de muestreo secundarios para la caracterización de la estructura del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en el APFF Nevado de Toluca (Conafor, 2012).

Figura 2. Diseño de los sitios de muestreo permanente.

Cada SMS se enumeró del 1 al 4. El SMS 1 fue ubicado en la parte central del conglomerado (Figura 2A) y el resto (2, 3 y 4) como periféricos al 1. A partir del centro de cada sitio, se marcó una parcela circular de 80 m² (5.04 m de radio) (Figura 2A) y una más de 9 m² (3×3 m). Se consideró la compensación por la pendiente del terreno.

Los árboles registrados y medidos en los SMS de 400 m² correspondieron a aquellos con diámetro normal (*DN*) mayor o igual a 5 cm. Todos los individuos fueron contabilizados y marcados a partir del árbol más cercano al norte (0°) y se continuó en sentido a las manecillas del reloj. Se registró su nombre científico o común, el *DN* del fuste (cinta diamétrica Forestry Suppliers Inc[®] modelo 283D/5m) y altura total (hipsómetro láser Nikon Forestry Pro II modelo FP550).

Caracterización de la estructura arbustiva y herbácea

Para caracterizar el estrato arbustivo, en los sitios de 80 m² se consideraron los individuos con *DN* mayor a 2.50 cm, pero menor a 5 cm. El estrato herbáceo se caracterizó en los sitios de 9 m², donde se registró la cobertura de los siguientes grupos vegetales: gramíneas, helechos, musgos, líquenes y hierbas, esto en porcentaje con respecto a la superficie ocupada en el sitio, por lo que la suma de sus porcentajes no necesariamente fue del cien por ciento.

Análisis y procesamiento de datos

La estructura horizontal a lo largo del gradiente altitudinal del bosque de *P. hartwegii*, se caracterizó a partir del cálculo de la abundancia (número de árboles), la dominancia (área basal) y la frecuencia (presencia de la especie por sitio). Estas variables se estimaron de forma absoluta y relativa (%), y en función de estas se obtuvieron los índices de Valor de Importancia (*IVI*) y de Valor Forestal (*IVF*). El *IVI* define las especies que contribuyen en mayor medida a la estructura del ecosistema (Mostacedo y Fredericksen, 2000), y se determinó mediante la suma de la abundancia, dominancia y frecuencia relativa, dividiendo el resultado entre tres. El *IVF* determina la estructura bidimensional arbórea, y se calculó sobre la base de dos factores: 1) la suma de los *DN* y la cobertura de copa en el plano horizontal, y 2) la altura total en el plano vertical (Corella *et al.*, 2001).

Análisis estadísticos

El análisis de la estructura forestal del bosque de *P. hartwegii* consideró la comparación de la distribución de la densidad arbórea (*DA*) y el área basal (*AB*) a lo largo del gradiente altitudinal evaluado. Para el estrato arbóreo, se comparó la *DA* y el *AB* entre las diferentes clases diamétricas (en intervalos de 10 cm) de los árboles en cada piso altitudinal. El estrato arbustivo y herbáceo consideró las mismas variables dasométricas (*DA* y *AB*), pero se compararon entre los diferentes pisos altitudinales. Todos los análisis estadísticos se realizaron en el paquete estadístico *SAS/ETS® SAS Inc. software* (Statistical Analysis System, 2009) a través de un análisis de varianza (*ANOVA*) y comparación de medias de *Tukey* ($p < 0.05$) entre las variables dasométricas evaluadas.

Resultados y Discusión

Estructura y composición arbórea

La comunidad arbórea en el APFF del Nevado de Toluca a lo largo del gradiente altitudinal evaluado, se conformó principalmente por dos especies arbóreas: *P. hartwegii* y *A. religiosa* (Cuadro 1). Otros taxones presentes fueron *Quercus* sp., *Cupressus* sp. y *Pinus ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schltld., pero en una abundancia fue menor a dos individuos en un solo conglomerado (compuesto por cuatro sitios). Al respecto, *P. hartwegii* fue el taxón más abundante y dominante en todo el gradiente. Su mayor abundancia se registró a 3 800 msnm (59 individuos), con una dominancia de 100 % entre 3 900 y 4 000 msnm; su dominancia se redujo con la disminución de la altitud, aunque solo en 9 %, es decir, de 100 % de dominio en las dos altitudes superiores, a los 3 400 msnm fue de 91 % (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros e índices estructurales estimados para las especies arbóreas registradas a lo largo de un gradiente de altitud (3 400 a 4 000 m), en el APFF Nevado de Toluca.

Parámetro estructural	Especie	Altitud (m)						
		3 400	3 500	3 600	3 700	3 800	3 900	4 000
Abundancia absoluta (Núm. de individuos)	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	11.3	18.0	27.0	52.0	59.0	10.0	12.0
	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham.	6	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	Otras	0.0	1.0	2.0	0.0	0.1	0	0
Abundancia relativa (%)	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	61	96	91	99	99	100	100
	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham.	39	2	1	1	0	0	0
	Otras	0	2	8	0	1	0	0
Dominancia absoluta (m ²)	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	0.69	0.56	0.64	0.51	1.21	0.54	0.68
	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham.	0.06	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00

	Otras	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Dominancia relativa (%)	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	91	93	99	99	99	100	100
	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schlttdl. & Cham.	9	6	0	1	0	0	0
	Otras	0	1	1	0	1	0	0
Frecuencia absoluta (%)	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	100	100	100	100	100	100	100
	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schlttdl. & Cham.	100	25	25	25	0	0	0
	Otras	0	25	50	0	50	0	0
Frecuencia relativa (%)	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	50	67	57	80	67	100	100
	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schlttdl. & Cham.	50	17	14	20	0	0	0
	Otras	0	17	29	0	33	0	0
IVI (Índice de Valor de Importancia) (%)	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	67	85	82	93	88	100	100
	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schlttdl. & Cham.	33	8	5	7	0	0	0
	Otras	0	6	12	0	11	0	0
IVF (Índice de Valor Forestal) (%)	<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	66	45	54	58	64	100	100
	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schlttdl. & Cham.	34	43	22	42	0	0	0
	Otras	0	11	23	0	36	0	0

Estos resultados confirman que *P. hartwegii* sigue manteniendo su abundancia y dominancia a lo largo de todo el gradiente muestreado, específicamente entre 3 700 y 4 000 msnm, donde forma bosques monoespecíficos (Challenger y Soberón, 2008). Mientras que en el intervalo de 3 400 a 3 600 msnm, la presencia de *A. religiosa* aumentó de tal manera que a 3 400 msnm presentó la mayor frecuencia, pero en una misma proporción que *P. hartwegii* (50 % en frecuencia absoluta) (Cuadro 1).

Los índices de Valor de Importancia (*IVI*) y de Valor Forestal (*IVF*) refuerzan lo arriba mencionado sobre que *P. hartwegii* es la especie arbórea que más contribuye a la estructura arbórea, tanto vertical como horizontal, a lo largo de todo el gradiente muestreado, dado que fue la especie que evidenció la mayor proporción en estos índices (Cuadro 1), principalmente a los 3 900 y 4 000 m (100 %). Sin embargo, por debajo de ese intervalo altitudinal (3 400-3 800 m), tanto el *IVI* como el *IVF* de *P. hartwegii* disminuyó hasta en 45 % de *IVF* a los 3 500 m, en donde su contribución a la estructura arbórea resultó prácticamente igual a la de *A. religiosa*, cuyo *IVF* fue de 43 %.

Estos resultados indicarían que, aun cuando *P. hartwegii* mantiene su abundancia y dominancia a lo largo de todo el gradiente altitudinal muestreado en el APFF del Nevado de Toluca, tal como se ha citado previamente (Farjon y Filer, 2013; Jobbágy y Jackson, 2000), por debajo de los 3 900 m, la especie presenta importantes cambios en su composición estructural. Lo anterior podría relacionarse con las actividades económicas permisibles en el APFF Nevado de Toluca, como la cosecha y tala selectiva de árboles, las cuales tienen más impacto sobre la estructura del bosque de *P. hartwegii* ubicado entre 3 400 y 3 800 m de altitud (Jafari *et al.*, 2013).

Los parámetros dasométricos evaluados, indicaron que la distribución de la densidad arbórea (*DA*) para el bosque de *P. hartwegii* presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las diferentes categorías diamétricas para todo el gradiente altitudinal, excepto para la *DA* observada a 3 900 m (Cuadro 2). Resalta que la *DA* fue mayor para la clase diamétrica de 5-15 cm por debajo de los 3 800 msnm, con un máximo de 1 287.5 árboles ha⁻¹ a 3 800 msnm (Cuadro 2), mientras que a 3 900 y 4 000 msnm, la *DA* para esta clase diamétrica fue de 15 a 7 veces menor (81.2 y 181.2 árboles ha⁻¹, respectivamente).

Cuadro 2. Densidad arbórea (*DA*, árboles ha⁻¹) y área basal (*AB*, m² ha⁻¹) por clase diamétrica (en intervalos de 10 cm) y altitud para el bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en un gradiente de 600 m, en el APFF Nevado de Toluca.

Altitud (m)	Variable	Intervalos de clases diamétricas (cm)							
		5-15	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85
3 400	<i>AB</i>	1.59	0.74	0.00	5.84	1.00	9.39	0.00	0.00
		±0.44	±0.47	±0.00	±2.36	±1.00	±3.48	±0.00	±0.00
	<i>DA</i>	300.00	18.75	0.00	43.75	6.25	31.25	0.00	0.00
		±62.08	±11.96	±0.00	±18.75	±6.25	±11.96	±0.00	±0.00
3 500	<i>AB</i>	1.79	0.12	0.94	3.37	5.69	3.62	0.00	0.00
		±0.82	±0.12	±0.57	±2.30	±2.95	±2.10	±0.00	±0.00
	<i>DA</i>	331.25	6.25	12.50	25.00	31.25	12.50	0.00	0.00
		±175.70	±6.25	±7.21	±17.67	±5.72	±7.21	±0.00	±0.00
3 600	<i>AB</i>	3.50	1.75	0.55	4.05	3.84	1.69	0.00	0.00
		±1.96	±1.58	±0.55	±1.11	±2.52	±1.69	±0.00	±0.00
	<i>DA</i>	525.00	62.50	6.25	31.25	18.25	6.25	0.00	0.00
		±301.73	±54.49	±6.25	±6.25	±11.97	±6.25	±0.00	±0.00
3 700	<i>AB</i>	5.42	0.69	0.00	0.00	0.00	3.50	0.00	3.18
		±2.16	±0.40	±0.00	±0.00	±0.00	±2.02	±0.00	±3.18
	<i>DA</i>	1 193.75	31.25	0.00	0.00	0.00	12.50	0.00	6.25
		±502.33	±18.75	±0.00	±0.00	±0.00	±7.22	±0.00	±6.25
3 800	<i>AB</i>	6.00	0.00	0.98	0.65	6.04	9.19	4.25	3.12
		±3.19	±0.00	±0.57	±0.65	±3.38	±3.52	±2.45	±3.12
	<i>DA</i>	1 287.50	0.00	12.50	6.25	31.25	31.25	12.25	6.25
		±649.16	±0.00	7.22	6.25	15.73	11.97	7.22	±6.25

3 900	<i>AB</i>	0.81	3.34	0.85	0.94	2.34	5.32	0.00	0.00
		±0.62	±0.95	±0.50	±0.94	±1.37	±3.29	±0.00	±0.00
	<i>DA</i>	81.25	112.50	12.50	6.25	12.50	18.75	0.00	0.00
		±57.17	±33.07	7.22	6.25	7.22	11.97	0.00	±0.00
4 000	<i>AB</i>	0.96	1.22	2.11	2.07	4.83	2.11	2.99	0.00
		±0.44	±1.02	±1.20	±1.27	±2.86	±2.11	±2.99	±0.00
	<i>DA</i>	181.25	43.75	31.25	12.50	18.75	6.25	6.25	0.00
		±94.30	±35.90	±15.73	±7.22	±11.97	±6.25	±6.25	±0.00

Es importante señalar que, para ambos pisos altitudinales, la mayor *DA* correspondió a la clase diamétrica de 15 a 25 cm de diámetro, lo cual indica que la regeneración se presenta, principalmente, por abajo de 3 800 m de altitud. En los niveles superiores la regeneración es limitada.

La regeneración del bosque de *P. hartwegii* en las altitudes superiores, podría estar limitada por las actividades antrópicas como la sobreexplotación de los recursos naturales, que a su vez modifican las condiciones bióticas y abióticas en estos bosques, y que en conjunto con la baja viabilidad y germinación de su semilla (Iglesias *et al.*, 2000) limitarían la regeneración de manera natural en esas altitudes (Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo, 2009). Dichas condiciones serían responsables de que la estructura del bosque de *P. hartwegii* a estas altitudes, estén modificándose significativamente (de acuerdo con el *IVF* determinado). Por ello, los resultados estimulan a promover estrategias que permitan recuperar la estructura del bosque de *P. hartwegii* con base en estudios como el de Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo (2009), quienes señalan que la sobrevivencia de plántulas de *P. hartwegii* aumenta cuando se usan plantas nodrizas que promueven un microclima más favorable en estas altitudes tanto para la germinación como para la sobrevivencia. Por ello, en ese tipo de bosques se recomienda el uso de plantas nodrizas de

Lupinus montanus Kunth integradas a los programas de reforestación en el APFF del Nevado de Toluca.

En cuanto al diámetro de los árboles, en el presente estudio resalta la ausencia de las clases diamétricas de 65-75 cm y de 75-85 cm de diámetro en el intervalo altitudinal de 3 400 a 3 600 m, lo que sugiere la presencia de algún disturbio natural o antrópico. Báez *et al.* (2015) documentan que los patrones regionales en la estructura y dinámica de bosques de alta montaña a diferentes gradientes altitudinales, se debe a la interacción de factores bióticos y abióticos con la historia de uso de la tierra. Ello corroboraría que en general, los bosques de *P. hartwegii* en el APFF del Nevado de Toluca están expuestos a la degradación por actividades como la tala legal e ilegal, el sobrepastoreo, quema de pastizales, entre otras actividades (Endara *et al.*, 2012; Pérez-Suárez *et al.*, 2022), lo que conlleva a la modificación de sus patrones estructurales.

En cuanto a la distribución del área basal (*AB*), solo se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las diferentes clases diamétricas a 3 400 msnm (Cuadro 1), con el mayor registro a esa altitud y a 3 800 m, y con un *AB* alrededor de $9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ para la clase diamétrica de 55 a 65 cm de diámetro. Lo anterior coincide con que a esa misma altitud (3 800 m) se obtuvo el valor más alto de *DA* para los individuos de la clase diamétrica más pequeña (5-15 cm), lo cual es característico de sitios donde se aplican prácticas silviculturales como reforestación, lo cual fue confirmado *in situ* (campo) por la disposición simétrica observada en los árboles más pequeños y la presencia de algunos cuantos individuos con diámetros mayores.

Los pocos ejemplares con diámetros mayores (más de 55 cm de diámetro) a lo largo de todo el gradiente altitudinal muestreado, corresponden a los árboles con las mejores características dasométricas y fenotípicas, es decir, los árboles Padre o semilleros. También podrían ser los que se estuvieran extrayendo de forma ilegal, lo cual se infiere de los daños observados en los individuos remanentes en los sitios de estudio y que indican una corta inadecuada, tales como desprendimiento extremo de corteza, pérdida de ramas y follaje nuevo, principalmente, lo cual se ha observado previamente en la zona de estudio (Regil *et al.*, 2014). Esto limitaría la producción y dispersión de semillas, hechos observados en otros estudios para la misma zona (Endara, 2007), e indudablemente, afectaría a la estructura

del bosque a lo largo del gradiente altitudinal, y con ello se genera una estructura arbórea con menor complejidad por la baja regeneración derivada de la expansión urbana y la extracción selectiva del arbolado (Regil *et al.*, 2014).

Estructura y composición arbustiva y herbácea

El estrato arbustivo, caracterizado en el área de muestreo por dos clases diamétricas principales: a) 2.5 a 5.0 cm y b) mayores a 5.0 cm de diámetro, evidenció que solo la *DA* de arbustos con diámetros de la segunda clase diamétrica, fue diferente significativamente ($p < 0.05$) entre los pisos altitudinales (Cuadro 3). El máximo valor observado en *DA* fue a 3 700 msnm, tanto para arbustos de la primera clase diamétrica como para la segunda, con 44 y 31 individuos ha^{-1} , respectivamente. Un comportamiento similar se observó para el *AB*, es decir, el mayor valor para ambas clases diamétricas se registró en el mismo piso altitudinal (3 700 m). Destaca la ausencia de arbustos pertenecientes a esas dos clases diamétricas entre 3 800 y 4 000 m de altitud (Cuadro 3). Esto indicaría que la estructura arbustiva puede comprometerse por eventos de disturbio como el pastoreo, ocoteo, reforestación, o por las prácticas de manejo.

Cuadro 3. Densidad arbórea (*DA*, árboles ha^{-1}) y área basal (*AB*, $m^2 ha^{-1}$) de arbustos entre 2.5-5.0 cm y mayores a 5 cm de diámetro por piso altitudinal establecido cada 100 m entre 3 400 y 4 000 m, en el APFF Nevado de Toluca.

Intervalo de categoría diamétrica	Variable	Altitud (m)						
		3 400	3 500	3 600	3 700	3 800	3 900	4 000
2.5-5.0 cm	<i>AB</i>	0.03	0.07	0.01	0.27	0.00	0.00	0.00
		±0.01	±0.06	±0.01	±0.01	±0.16	±0.00	±0.00
	<i>DA</i>	13.00	6.00	6.00	44.00	0.00	0.00	0.00

		±7.21	6.25	6.25	±29.53	±0.00	±0.00	±0.00
	AB	0.00	0.04	0.17	0.23	0.00	0.00	0.00
>5 cm		±0.00	0.03	0.16	±0.08	±0.00	±0.00	±0.00
	DA	0.00	13.00	0.00	31.00	0.00	0.00	0.00
		±0.00	12.50	0.00	±11.96	±0.00	±0.00	±0.00

En el estrato herbáceo se observaron diferentes tipos de cobertura vegetal: gramíneas, helechos, musgos y hierbas en general, los cuales estuvieron presentes en todos los pisos altitudinales, a excepción de los helechos (Cuadro 4). Las que presentaron la proporción más alta, fueron las gramíneas para todas las cotas altitudinales (Cuadro 4) en una proporción de alrededor de 80 % para la mayoría de los pisos altitudinales, lo que indica que este tipo de plantas tiene una alta asociación con el bosque de *P. hartwegii* en el APFF del Nevado de Toluca a lo largo de todo el gradiente altitudinal evaluado, sin cambios de manera significativa en la estructura del bosque. Lo anterior coincide con lo citado por Calderón de Rzedowski y Rzedowski (2010), quienes señalan que los pastos que principalmente se asocian a *P. hartwegii* son *Calamagrostis tolucensis* (Kunth) Trin. ex Steud., *Muhlenbergia macroura* (Kunth) Hitchc. y *Festuca tolucensis* Kunth, pastos registrados para la zona de estudio (Royo y Carson, 2006).

Cuadro 4. Cobertura de diferentes asociaciones vegetales (%) en el estrato herbáceo a lo largo de un gradiente de altitud (3 400 a 4 000 m) en el APFF Nevado de Toluca.

Altitud (m)	Gramíneas (%)	Helechos (%)	Musgo (%)	Líquenes (%)	Hierbas (%)
3 400	73	0	18	10	3
3 500	70	1	2	0	25
3 600	84	0	3	4	11
3 700	31	0	8	8	14

3 800	49	0	8	13	10
3 900	80	0	14	3	8
4 000	73	0	18	10	3

Conclusiones

Los bosques de *Pinus hartwegii* en el APFF del Nevado de Toluca, siguen manteniendo su abundancia y dominancia en el intervalo altitudinal de 3 400 a 4 000 m, específicamente entre 3 700 y 4 000 m, donde continúan formando bosques monoespecíficos. Esta especie contribuye en 100 % a la composición estructural del bosque solo entre 3 900 y 4 000 msnm ya que, por abajo de ese intervalo, su valor e importancia forestal en la estructura está significativamente afectada (disminuye hasta en 45 %), lo cual evidencia un importante cambio estructural en función de la altitud, derivado principalmente de actividades antrópicas extremas. Por ello, se sugiere un manejo diferencial basado en la estructura y actividades permisibles por altitud que no influya sobre la dinámica del bosque y su regeneración, pero tampoco en la sustentabilidad del bosque que se ha comprometido por el deterioro acumulado en su estructura y función. Se concluye que la altitud es una variable importante para considerarse en los planes de manejo de los bosques de alta montaña.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto Conacyt-Ciencia Básica 219696, y beca posdoctoral otorgada a Griselda Chávez Aguilar.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución por autor

Griselda Chávez-Aguilar y Marlín Pérez-Suárez: idea original del estudio, supervisión y trabajo de campo, análisis de datos y redacción del manuscrito; Gisela Virginia Campos-Ángeles: análisis de datos, escritura y revisión del documento.

Referencias

Báez, S. and S. L. Collins. 2008. Shrub invasion decreases diversity and alters community stability in northern Chihuahuan Desert plant communities. PLOS ONE 3(6):e2332. Doi: [10.1371/journal.pone.0002332](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002332).

Báez, S., A. Malizia, J. Carilla, C. Blundo, ... and K. J. Feeley. 2015. Large-scale patterns of turnover and basal area change in Andean forests. PLOS ONE 10(5):e0126594. Doi: [10.1371/journal.pone.0126594](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126594).

Bhutia, Y., R. Gudasalamani, R. Ganesan and S. Saha. 2019. Assessing forest structure and composition along the altitudinal gradient in the State of Sikkim, Eastern Himalayas, India. Forests 10(8):633. Doi: [10.3390/f10080633](https://doi.org/10.3390/f10080633).

Calderón de Rzedowski, G. y J. Rzedowski. 2010. Flora fanerogámica del Valle de México. Instituto de Ecología, A. C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Xalapa, Ver., México. 975 p.

Challenger, A. y J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres. In: Soberón, J., G. Halffter y J. Llorente-Bousquets (comps.). Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la

biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Tlalpan, D. F., México. pp. 87-108.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2012. Inventario Nacional Forestal y de Suelos, Manual y procedimientos para el muestreo de campo, re-muestreo 2012. Comisión Nacional Forestal y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Zapopan, Jal., México. 140 p.

Corella J., F., J. I. Valdez H., V. M. Cetina A., F. V. González C., A. Trinidad S. y J. R. Aguirre R. 2001. Estructura forestal de un bosque de mangles en el noreste del estado de Tabasco, México. *Ciencia Forestal en México* 26(90):73-102. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/914>. (12 noviembre de 2021).

Durán-Medina, E., J. F. Mas and A. Velázquez. 2005. Land use/cover change in community-based forest management regions and protected areas in Mexico. In: Bray, D. B., L. Merino-Pérez y D. Barry (eds.). *The Community Forests of Mexico, Managing for Sustainable Landscapes*. University of Texas Press. Austin, TX, USA. pp. 215-238.

Endara A., A. R. 2007. Estructura forestal de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Edo. Méx., México. 76 p.

Endara A., A. R., S. Franco M., G. Nava B., J. I. Valdez H. and T. S. Fredericksen. 2012. Effect of human disturbance on the structure and regeneration of forests in the Nevado de Toluca National Park, Mexico. *Journal of Forestry Research* 23(1):39-44. Doi: [10.1007/s11676-012-0226-8](https://doi.org/10.1007/s11676-012-0226-8).

Farjon, A. and D. Filer. 2013. *An atlas of the world's conifers: An analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status*. Brill. Leiden, ZH, The Netherlands. 512 p.

Farjon, A., J. A. Pérez de la R. y B. T. Styles. 1997. *Guía de Campo de los Pinos de México y América Central*. The Royal Botanic Gardens, Instituto Forestal de Oxford y Universidad de Oxford. Grimbergen, BF, Bélgica. 151 p.

Franco M., S., H. H. Regil G., C. González E. y G. Nava B. 2006. Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* (61):38–57. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112006000300004. (3 enero de 2022).

Gadow, K. v., C. Y. Zhang, C. Wehenkel, A. Pommerening, ... and X. H. Zhao. 2012. Forest Structure and Diversity. In: Pukkala, T. and K. v. Gadow (eds.). *Continuous Cover Forestry. Managing Forest Ecosystems*. Springer. Dordrecht, ZH, The Netherlands. pp. 29–83.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática Köppen. Serie Libros, Núm. 6. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, D. F., México. 91 p.

Girardin, C. A. J., Y. Malhi, L. E. O. C. Aragão, M. Mamani, ... and R. J. Whittaker. 2010. Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. *Global Change Biology* 16(12):3176–3192. Doi: [10.1111/j.1365-2486.2010.02235.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02235.x).

Gómez D., J. A. y F. Villalobos. 2020. Montañas: cómo se definen y su importancia para la biodiversidad y la humanidad. *CIENCIA ergo-sum* 27(2):e88. Doi: [10.30878/ces.v27n2a9](https://doi.org/10.30878/ces.v27n2a9).

Granados R., G. R., A. Toscana A. y A. Villaseñor F. 2018. Recategorización del Nevado de Toluca: Elementos escénicos y turismo. *Teoría y Praxis* (26):36-66. http://www.teoriaypraxis.uagro.mx/doctos/numero26/Granados_etal.pdf. (10 de septiembre de 2022).

Homeier, J., S. W. Breckle, S. Günter, R. T. Rollenbeck and C. Leuschner. 2010. Tree diversity, forest structure and productivity along altitudinal and topographical gradients in a species-rich Ecuadorian Montane Rain Forest. *Biotropica The Scientific Journal of the ATBC* 42(2):140-148. Doi: [10.1111/j.1744-7429.2009.00547.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00547.x).

Hu, M., A. Lehtonen, F. Minunno and A. Mäkelä. 2020. Age effect on tree structure and biomass allocation in Scot pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Annals of Forest Science* 77(3):90-104. Doi: [10.1007/s13595-020-00988-4](https://doi.org/10.1007/s13595-020-00988-4).

- Iglesias A., L. G., J. Alba L. y J. L. Enríquez. 2000. Estrategias para la conservación de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. en la región del Perote, Veracruz. Cuadernos de Biodiversidad 4:4-8. Doi: [10.14198/cdbio.2000.04.01](https://doi.org/10.14198/cdbio.2000.04.01).
- Jafari, S. M., S. Zarre and S. K. Alavipanah. 2013. Woody species diversity and forest structure from lowland to montane forest in Hyrcanian forest ecoregion. Journal of Mountain Science 10(4):609–620. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2652-2>.
- Jobbágy, E. G. and R. B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications: Ecological Society of America 10(2):423–436. Doi: [10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2).
- Körner, C. and J. Paulsen. 2004. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. Journal of Biogeography 31(5):713–732. Doi: [10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x).
- Manzanilla-Quiñones, U., Ó. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, E. J. Treviño-Garza y J. I. Yerena-Yamallel. 2019. Distribución actual y futura del bosque subalpino de *Pinus hartwegii* Lindl en el Eje Neovolcánico Transversal. Madera y Bosques 25(2):e2521804. Doi: [10.21829/myb.2019.2521804](https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521804).
- McElhinny, C., P. Gibbons, C. Brack and J. Bauhus. 2005. Forest and woodland stand structural complexity: its definition and measurement. Forest Ecology Management 218(1-3):1–24. Doi: [10.1016/j.foreco.2005.08.034](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.034).
- Mostacedo, B. y T. S. Fredericksen. 2000. Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. BOLFOR. Santa Cruz de la Sierra, SC, Bolivia. 87 p. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNACL893.pdf. (10 diciembre de 2018).
- Pérez-Suárez, M., J. E. Ramírez-Albores, J. J. Vargas-Hernández and F. U. Alfaro-Ramírez. 2022. A review of the knowledge of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.): current situation and the need for improved future projections. Trees 36(1):25-37. Doi: [10.1007/s00468-021-02221-9](https://doi.org/10.1007/s00468-021-02221-9).
- Ramírez-Contreras, A. y D. A. Rodríguez-Trejo. 2009. Plantas nodriza en la reforestación con *Pinus hartwegii* Lindl. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 15(1):43–48.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182009000100005. (30 enero de 2022).

Ramírez-Huerta, L., C. M. López-Guzmán, V. J. Arriola-Padilla, Z. Trejo-Sandoval, R. Pérez-Miranda y C. L. Jiménez-Sierra. 2016. La investigación en las Áreas Naturales Protegidas de la Región Centro y Eje Neovolcánico Transversal de México. *Áreas Naturales Protegidas Scripta* 2(2):37–66. Doi: [10.18242/anpscripta.2016.02.02.0003](https://doi.org/10.18242/anpscripta.2016.02.02.0003).

Regil G., H. H., S. Franco M., J. A. B. Ordóñez D., G. E. Nava B. y C. Mallén R. 2014. Procesos de deforestación y reducción de densidad del arbolado del parque nacional nevado de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(23):42–62. Doi: [10.29298/rmcf.v5i23.341](https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i23.341).

Royo, A. A. and W. P. Carson. 2006. On the formation of dense understory layers in forests worldwide: consequences and implications for forest dynamics, biodiversity, and succession. *Canadian Journal of Forest Research* 36(6):1345-1362. Doi: [10.1139/x06-025](https://doi.org/10.1139/x06-025).

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2016. Acuerdo por el que se da a conocer el Resumen del programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. Diario Oficial de la Federación, Segunda y Tercera secciones, 21 de octubre de 2016. https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/RESUMEN_NEVADO_TOLUCA.pdf. (1 de enero de 2017).

Seidler, R. 2017. Patterns of biodiversity change in anthropogenically altered forests. In: Roitberg, B. D. (ed.). *Reference Module in Life Sciences*. Elsevier. Amsterdam, NH, The Netherlands. pp. 1–17.

Sharma, J., S. Uggupta, M. Jayaraman, R. K. Chaturvedi, G. Bala and N. H. Ravindranath. 2017. Vulnerability of forests in India: A national scale assessment. *Environmental Management* 60(3):544–553. Doi: [10.1007/s00267-017-0894-4](https://doi.org/10.1007/s00267-017-0894-4).

Statistical Analysis System. 2009. SAS[®] Web Report Studio 4.2: User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 310 p.

Unger, M., J. Homeier and C. Leuschner. 2012. Effects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at different elevations in the equatorial Andes. *Oecologia* 170(1):263–274. Doi: [10.1007/s00442-012-2295-y](https://doi.org/10.1007/s00442-012-2295-y).

Waddell, E. H., L. F. Banin, S. Fleiss, J. K. Hill, ... and D. S. Chapman. 2020. Land-use change and propagule pressure promote plant invasions in tropical rainforest remnants. *Landscape Ecology* 35(9):1891-1906. Doi: [10.1007/s10980-020-01067-9](https://doi.org/10.1007/s10980-020-01067-9).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.