



DOI: [10.29298/rmcf.v15i81.1426](https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1426)

Artículo de investigación

Distribución espacial de *Pinus* y *Quercus* en un gradiente altitudinal de bosque templado en Guadalupe y Calvo, Chihuahua

Spatial distribution of *Pinus* and *Quercus* in an altitudinal gradient of temperate forest in *Guadalupe y Calvo*, state of *Chihuahua*

Samuel Alberto García-García¹, Eduardo Alanís Rodríguez^{1*}, Ernesto Alonso Rubio-Camacho², Óscar Alberto Aguirre-Calderón¹, José Israel Yerena-Yamalle¹, Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez¹, Alejandro Collantes Chávez-Costa³

Fecha de recepción/Reception date: 28 de agosto de 2023.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 21 de noviembre de 2023.

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. México.

²INIFAP, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. México.

³Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Cozumel. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: eduardo.alanisrd@uanl.edu.mx

*Corresponding author; e-mail: eduardo.alanisrd@uanl.edu.mx

Resumen

El objetivo del estudio fue determinar los patrones de distribución espacial de las especies de *Pinus* y *Quercus* a lo largo de un gradiente altitudinal en un bosque templado del noroeste de México. Se analizó la uniformidad de los individuos (W_i), la mezcla de especies (M_i) y la dominancia dimensional (U_i) mediante parámetros estructurales basados en las relaciones con los cuatro vecinos más cercanos. Los datos se obtuvieron de 37 sitios de muestreo en tres niveles altitudinales (Nivel 1: 2 200-2 600 m, Nivel 2: 2 600-2 800 m y Nivel 3: 2 800-3 200 m), lo que generó un total de 979 grupos estructurales para todas las especies. *Pinus* contribuyó con 191, 51 y 41 grupos en los niveles 1, 2 y 3; mientras que *Quercus* aportó 192, uno y cero, respectivamente. *Pinus* evidenció tendencia hacia la aleatoriedad, y los encinos también en el Nivel 1, aunque en este análisis se observó que a mayor altitud *Pinus* tiende hacia una distribución regular. La mezcla de especies fue de media a alta para *Pinus*, lo cual indica que sus individuos están rodeados de árboles de especies diferentes, y con *Quercus* ocurrió al contrario. La dominancia dimensional reveló que los ejemplares de *Pinus* tienen mayor altura que los del género *Quercus* en todo el gradiente, especialmente en el Nivel 1. Este enfoque proporciona una comprensión exacta de la función que cumplen las especies en la dinámica de los ecosistemas forestales.

Palabras clave: Altitud, conservación, dominancia dimensional, estructura arbórea, índices de vecindad, mezcla de especies.

Abstract

The objective of the study was to determine the spatial distribution patterns of *Pinus* and *Quercus* species along an altitudinal gradient in a temperate forest in northwestern Mexico. Individual uniformity (W_i), species mixture (M_i), and size dominance (U_i) were analyzed using structural parameters based on the relationships with the four nearest neighbors. Data were obtained from 37 sampling sites at three different altitude levels (Level 1: 2 200-2 600 m, Level 2: 2 600-2 800 m, and Level 3: 2 800-3 200 m), generating a total of 979 structural groups for all species. *Pinus* contributed 191, 51, and 41 groups at levels 1, 2, and 3, while *Quercus* contributed 192, one and zero, respectively. *Pinus* showed a tendency towards randomness, as did the oaks at Level 1; although, in this analysis, it was observed that at higher altitudes, *Pinus* tends towards a regular distribution. The species mix was medium to high for *Pinus*, which indicates that its individuals are surrounded by trees of different species, unlike *Quercus*. Size dominance revealed that *Pinus* specimens are taller than those of the *Quercus* genus throughout the gradient, especially at Level I. This approach provides an accurate understanding of the role of species in forest ecosystem dynamics.

Key words: Altitude, conservation, size dominance, tree structure, neighborhood indexes, species mix.

Introducción

En México, los bosques templados abarcan una amplia distribución, desde la región sur en Chiapas (16° N y 91° O) hasta la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California Norte (31° N y 115° O) (Luna-Cavazos *et al.*, 2008; López-Hernández *et al.*, 2018). La distribución de las especies está limitada por distintos factores climáticos y fisiográficos como la temperatura, precipitación, humedad, pendiente y altitud, entre otros (Poulos y Camp, 2005; Babst *et al.*, 2019; Dakhil *et al.*, 2019).

La composición estructural de los ecosistemas forestales es parte fundamental para la comprensión de los mecanismos de coexistencia entre especies dentro de las comunidades vegetales (Gu *et al.*, 2019). Para caracterizar la diversidad estructural de los rodales forestales se consideran tres elementos: la distribución espacial de los árboles, la mezcla de especies y la diferenciación en las dimensiones de los árboles (Gadow, 1999; Pommerening, 2002).

A nivel global se han realizado estudios acerca de la estructura y la relación de los bosques con la altitud, en los cuales se reconoce que tiene un papel importante en

la composición y distribución natural de la vegetación (Tiwari *et al.*, 2020; Thakur *et al.*, 2021; Asbeck *et al.*, 2022). En México se han llevado a cabo investigaciones con la finalidad de comprobar el impacto de los incendios en la distribución, grado de mezcla y dominancia dimensional (Rubio-Camacho *et al.*, 2017). También, particularmente, para definir y conocer dichas características espaciales en bosques templados (Chávez-Flores *et al.*, 2020; Graciano-Ávila *et al.*, 2020) y en bosques bajo conservación (García-García *et al.*, 2021). Sin embargo, tanto a nivel nacional como internacional, poco se ha abordado la distribución espacial de las especies con relación a los gradientes altitudinales.

El Área Natural Protegida (ANP) Cerro Mohinora abarca un amplio intervalo altitudinal que comprende de los 2 100 hasta 3 307 msnm y alberga una notable diversidad de ecosistemas. Además de su relevancia ecológica, se destaca por recibir precipitaciones pluviales abundantes. Se presentan bosques de coníferas en estado prístino, que incluyen asociaciones de géneros como *Abies* Mill., *Picea* A. Dietr., *Pseudotsuga* Carrière, *Pinus* L. y *Quercus* L., las cuales brindan hábitat a numerosos taxa, algunos de ellas endémicos o bien en situación de riesgo (Conanp, 2017).

Debido a lo anterior, es importante documentar la interacción espacial de las especies arbóreas a lo largo de gradientes altitudinales. Esto permitiría generar propuestas de conservación, restauración y aprovechamiento más adecuadas con un enfoque adaptativo.

El objetivo del presente estudio fue caracterizar la uniformidad espacial, el grado de mezcla y la dominancia dimensional de las especies de *Pinus* y *Quercus* a lo largo de un gradiente altitudinal en un bosque templado del ANP Cerro Mohinora, ubicada en Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Área Natural Protegida (ANP) Cerro Mohinora, localizada en el municipio Guadalupe y Calvo, Chihuahua, al noroeste de México (entre los 25°40'48" a 26°13'12" latitud norte y 106°31'48" a 107°06'00" longitud oeste) (Figura 1). La precipitación media anual oscila entre 200 y 1 800 mm, con una media mensual entre 0-40 mm en el mes más seco. La temperatura media anual varía de 5 a 12 °C, con una media entre -3 y 18 °C en el mes más frío (Arriaga *et al.*, 2000).

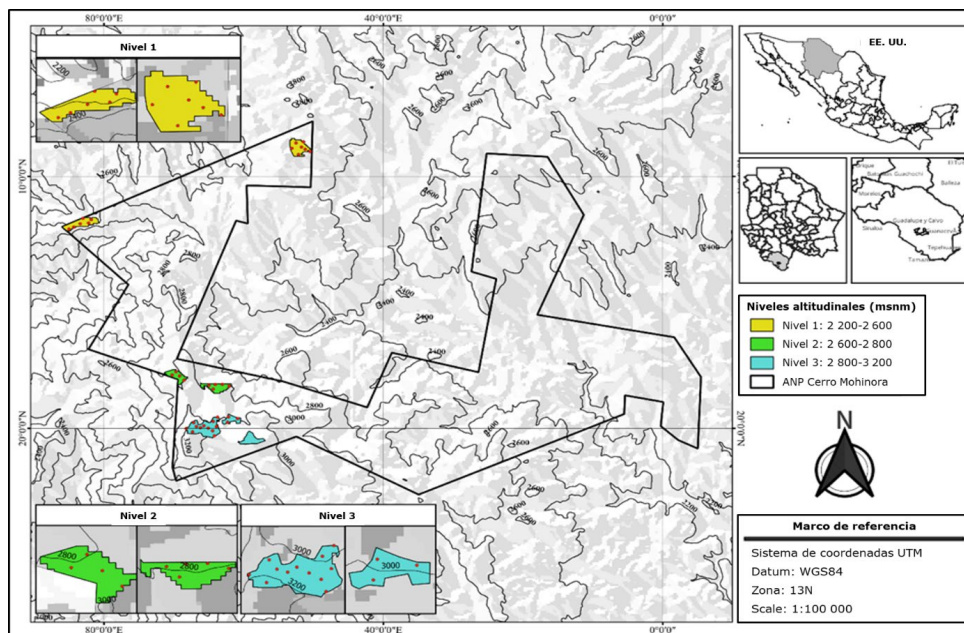


Figura 1. Ubicación del área de estudio y distribución de sitios de muestreo.

Diseño de muestreo

Se establecieron de manera aleatoria un total de 37 sitios circulares de muestreo con un tamaño de 1 000 m² cada uno y distribuidos en seis rodales con orientación norte, debido a que en esta exposición se encuentran, mayormente, las poblaciones de géneros como *Pseudotsuga*, *Picea* y *Abies*, las cuales son de interés para la conservación por su estatus de protección (García-Arévalo, 2008; Semarnat, 2019); en un gradiente altitudinal que comprende de los 2 200 a 3 200 m, donde se definieron tres niveles de altura que abarcaron el máximo intervalo altitudinal y los diferentes tipos de vegetación registrados en el programa de manejo del ANP (Conanp, 2017): Nivel 1 (2 200-2 600 m), Nivel 2 (2 600-2 800 m) y Nivel 3 (2 800-3 200 m). Se consideraron dos rodales en cada nivel altitudinal para incluir los distintos tipos de vegetación presentes, y se aplicó una intensidad de muestreo de 2 %.

En cada uno de los sitios de 1 000 m² se recopiló información dasométrica del estrato arbóreo, centrándose en individuos con un diámetro normal (*DN*) ≥ 7.5 cm. Las variables registradas del arbolado incluyeron la altura total (*h*) y el *DN*. La altura se estimó utilizando un clinómetro *Suunto*[®] Pm-5, mientras que el diámetro normal se midió con una forcípula de aluminio *Haglöf*[®] Mantax Blue. La distancia de los árboles al centro del sitio se registró con una cinta métrica *Truper*[®] TP20ME de 20 m. Además, se usó una brújula *Brunton GEO*[®] Pocket para obtener el azimut. La nomenclatura e identidad correcta de las especies se comprobó mediante la plataforma *Tropicos*[®] (Tropicos, 2022).

Análisis de datos

Los patrones de distribución espacial se determinaron a partir de parámetros estructurales basados en las relaciones entre un árbol referencia (i) y sus cuatro vecinos más cercanos, lo que expresa apropiadamente las características estructurales espaciales de las comunidades vegetales y permite diseñar prácticas de manejo más adecuadas a las condiciones específicas de los bosques (Hui y Gadow, 2002; Pastorella y Paletto, 2013; Rubio-Camacho *et al.*, 2023).

De acuerdo con Gadow *et al.* (1998), el Índice de Uniformidad de Ángulos (W_i) se basa en la medición de los ángulos entre los vecinos a un árbol referencia i y su comparación con un ángulo estándar α , y adquiere valores de cero hasta uno; un valor próximo a cero refleja regularidad, valores cercanos a 0.5 evidencian predisposición a la aleatoriedad y los contiguos a uno exhiben escenarios de agrupamiento.

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (1)$$

Donde:

W_i = Valor del índice para el j -ésimo árbol referencia

n = Número de árboles vecinos considerados

V_{ij} = Variable 1 cuando el j -ésimo ángulo α entre dos árboles vecinos próximos es menor o igual al ángulo estándar α , en caso contrario toma un valor de 0

La mezcla de especies se determinó en función del Índice de Mezcla de Especies (M_i). Fuldner (1995) lo define como la proporción de n vecinos más cercanos que no corresponden a la especie del árbol referencia.

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_j \quad (2)$$

Donde:

M_i = Valor del índice para el j -ésimo árbol referencia

n = Número de árboles vecinos considerados

V_j = Igual a 0 cuando el árbol j es de la misma especie que el árbol referencia i y será 1 en caso contrario (Gadow *et al.*, 2007)

La dominancia en altura entre géneros se comprobó con el Índice de Dominancia Dimensional (U_i), el cual refleja la proporción de árboles vecinos más pequeños que el árbol referencia i (Gadow *et al.*, 1998).

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_j \quad (3)$$

Donde:

U_i = Valor del índice para el j -ésimo árbol referencia

n = Número de árboles vecinos considerados

V_j = Igual a 1 si el árbol j es menor al árbol referencia i , y 0 en caso contrario

Con cuatro vecinos, el Índice de Dominancia (U_i) toma cinco valores y es útil para interpretar la dominancia relativa de una especie o género (Aguirre *et al.*, 2003; Gadow *et al.*, 2007).

Los índices se analizaron utilizando el programa *R Studio* (Versión: 2023.09.1+494) (R Core Team, 2019) dentro de una ventana de observación (W) (sitios de muestreo) donde se ejecutan las fórmulas anteriormente descritas. En dicha ventana de observación se consideró el efecto borde, ya que este representa un papel importante para la adecuada interpretación de la estructura espacial, ya que existen árboles dentro de los sitios de muestreo que se localizan próximos al borde y regularmente sus vecinos más cercanos están fuera de este, lo que implica errores en la estimación de los valores de vecindad de los árboles que están dentro (Pommerening y Stoyan, 2006).

Con el propósito de evitar los errores antes citados se aplicó el estimador de corrección de bordes del vecino más cercano (*NN1: Nearest-neighbour edge-correction concepts*, por sus siglas en inglés), el cual consiste en excluir como árbol referencia (i) aquellos cuya distancia a su j -ésimo vecino más cercano sea menor a la distancia entre este y el borde del sitio de muestreo (W); de igual manera, estos pueden formar parte de otros grupos estructurales como vecino cercano (Pommerening y Stoyan, 2006).

Análisis estadístico

Todos los índices, gráficos y análisis estadísticos se llevaron a cabo con el *software R* (R Core Team, 2019), en el cual para calcular los promedios y sus intervalos de confianza (IC) de 95 %, por sitio y nivel altitudinal, se generaron simulaciones *BOOTSTRAP* (999). Además, para los contrastes estadísticos entre tratamientos se

usó el método de los percentiles de la distribución *BOOTSTRAP* para dos muestras independientes mediante la función *pb2gen* en R (Mair y Wilcox, 2020).

Resultados y Discusión

Características dasométricas

En el Cuadro 1 se muestra el promedio de las variables dasométricas estimadas de todas las especies registradas. En el Nivel 1 se presentaron cuatro especies de *Pinus*. Se observó que *Pinus engelmannii* Carrière no tuvo individuos en los niveles 2 y 3, debido a que su intervalo de distribución varía de 1 600 a 2 600 m (Jiménez y Méndez, 2021); lo contrario se apreció en la densidad de individuos de *Pinus durangensis* Martínez y *P. strobiformis* Engelm. en el Nivel 2, donde es mayor a los niveles 1 y 3, ya que estos pinos se desarrollan de manera óptima a partir de 2 400 msnm (Pérez-Olvera y Dávalos-Sotelo, 2008). En el caso de *Quercus*, cuatro especies tuvieron su mayor densidad en el Nivel 1 (2 200-2 600 m), y disminuyó o fue nulo en los niveles 2 y 3; esta pérdida de presencia en las altitudes superiores puede atribuirse a que las especies de *Quercus* no suelen distribuirse de manera abundante en altitudes cercanas a los 2 800 y 3 000 m (Martínez-Calderón *et al.*, 2017; Uribe-Salas *et al.*, 2019).

Cuadro 1. Características dasométricas de las especies presentes en el gradiente altitudinal.

Especies	Densidad ($N\ ha^{-1}$)	$D_{1.30}$ (cm)	h (m)
-----------------	---	-----------------------------------	---------------------------

	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
<i>Abies durangensis</i> Martínez	16	162	269	20.57	18.04	19.78	13.99	12.72	10.63
<i>Arbutus arizonica</i> (A. Gray) Sarg.	9	0	0	19.25	0.00	0.00	7.07	0.00	0.00
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	19	4	0	22.76	14.38	0.00	8.12	7.45	0.00
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	8	8	1	19.10	10.64	26.00	7.97	5.71	6.20
<i>Pinus arizonica</i> Engelm.	77	33	27	20.89	19.13	20.05	14.33	9.17	11.12
<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.	18	59	19	25.00	21.29	17.16	14.90	11.83	9.10
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	14	23	5	38.11	33.31	36.86	17.51	15.88	15.86
<i>Pinus engelmannii</i> Carrière	80	0	0	21.30	0.00	0.00	13.52	0.00	0.00
<i>Populus tremuloides</i> Michx.	35	22	30	16.32	10.73	31.06	8.55	7.95	17.09
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	6	109	104	56.25	26.72	22.88	19.71	17.30	10.82
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	25	0	0	17.22	0.00	0.00	10.10	0.00	0.00
<i>Quercus fulva</i> Liebm.	35	1	0	19.62	44.00	0.00	9.76	22.50	0.00
<i>Quercus rugosa</i> Née	29	1	0	23.50	38.00	0.00	10.12	21.60	0.00
<i>Quercus sideroxylla</i> Bonpl.	169	1	1	16.65	19.00	48.50	10.12	9.50	12.35
<i>Picea mexicana</i> Martínez	0	0	46	0.00	0.00	21.91	0.00	0.00	10.13
Total general	540	424	501						

$D_{1.30}$ = Diámetro normal promedio a 1.30 m; h = Altura promedio; N1 = Nivel altitudinal 1 (2 200-2 600 m); N2 = Nivel altitudinal 2 (2 600-2 800 m); N3 = Nivel altitudinal 3 (2 800-3 200 m).

Es importante señalar que la presencia y patrones de la vegetación a lo largo de los gradientes altitudinales se generan debido a la interacción compleja de diversos factores tales como la altitud, la exposición a la radiación solar y la posición topográfica de las poblaciones vegetales, entre otros elementos observables (Girardin *et al.*, 2014; Jadán *et al.*, 2017; Cabrera *et al.*, 2019).

En ese sentido, se observa un dominio significativo de *Abies durangensis* Martínez y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el Nivel 3, donde las condiciones ambientales son adversas para la mayoría de las especies de *Pinus* y *Quercus*, ya que la altitud ejerce influencia sobre la temperatura y la humedad tanto del entorno

como del suelo, lo cual puede traducirse en menor crecimiento de los individuos, reducción en la supervivencia de la regeneración, impacto en la viabilidad de las semillas y un deterioro en la vitalidad de la vegetación (Champo-Jiménez *et al.*, 2012; Gutiérrez y Trejo, 2014; Villanueva-Díaz *et al.*, 2018).

Distribución espacial arbórea en el gradiente altitudinal

En la Figura 2 se ilustra la distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios del Nivel 1 con base en el estimador *NN1*, lo que significa que solo se representan los árboles que podrían ser el árbol *i* del grupo estructural. En el análisis de los índices de vecindad se emplearon un total de 393 grupos estructurales formados por un árbol referencia y cuatro árboles vecinos. Además, se identificó que los géneros *Quercus* y *Pinus* tuvieron la mayor cantidad de grupos estructurales, con 192 y 141 respectivamente.

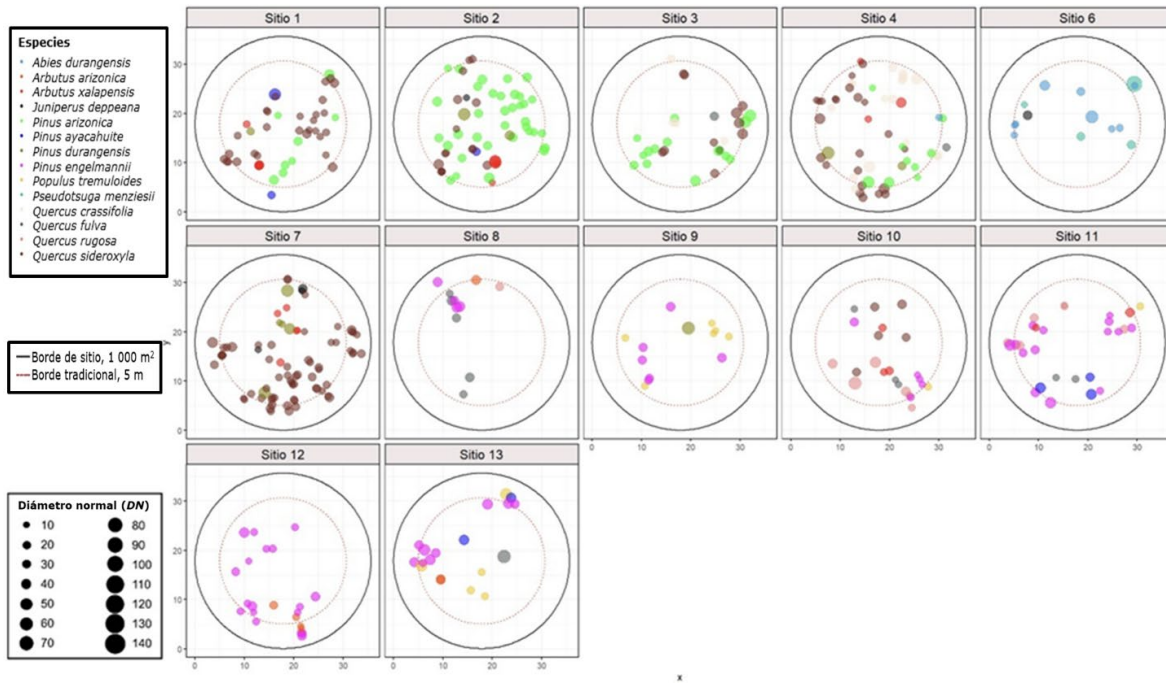


Figura 2. Distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios por género en el Nivel 1.

En la Figura 3 se muestra la distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios del Nivel 2. En este análisis se incluyeron 183 grupos estructurales. Se observó que los sitios 2, 8 y 1 tuvieron la mayor cantidad de grupos con 36, 28 y 27, respectivamente. *Pinus* fue representado en términos de grupos estructurales por 51 y *Quercus* solo fue parte de un grupo estructural.

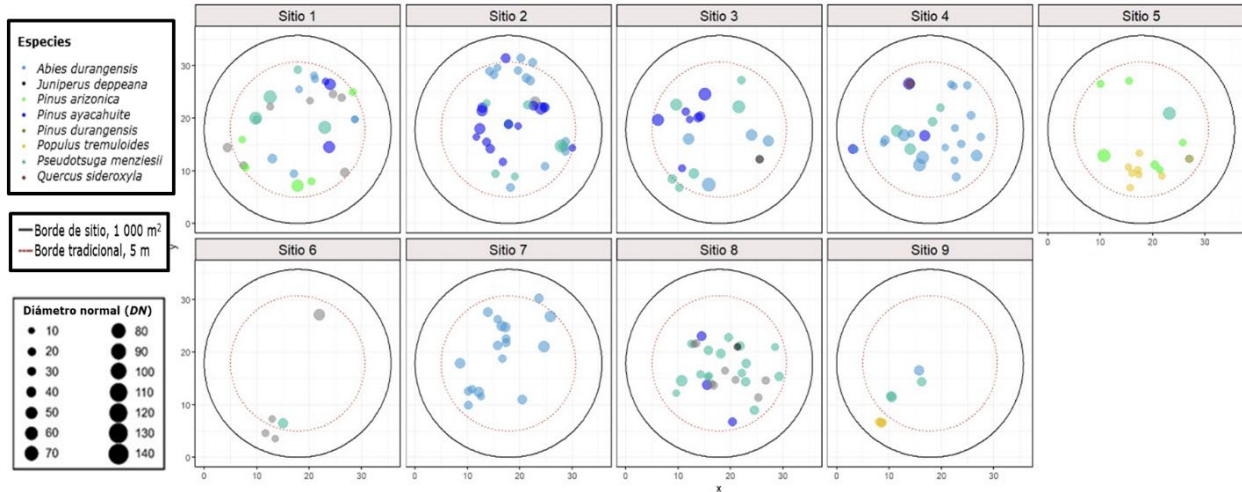


Figura 3. Distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios por género en el Nivel 2.

Finalmente, en la Figura 4 se presenta la distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios del Nivel 3, en el que se consideraron 403 grupos estructurales. En cuanto a las especies de *Pinus* se registraron 26 grupos estructurales para *P. arizonica* Engelm., 12 para *P. strobiformis* y tres para *P. durangensis*. No se obtuvieron grupos estructurales para *Quercus sideroxyla* Bonpl., único encino presente en esta altitud.

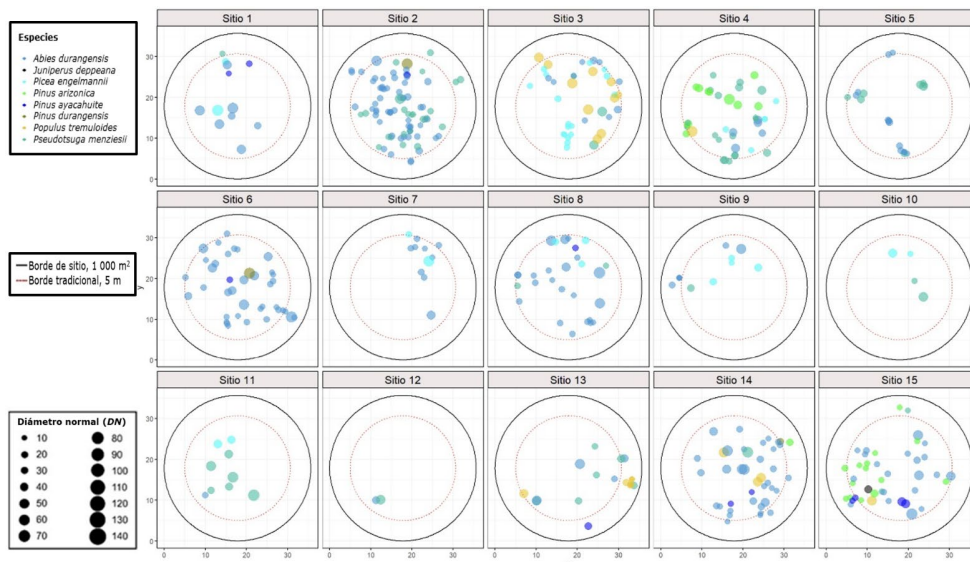


Figura 4. Distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios por género en el Nivel 3.

Se observa que, a menor densidad arbórea, hay menos cantidad de grupos estructurales, como se evidencia en el Nivel 2, aunque también es determinante la distancia entre árboles. García-García *et al.* (2021) citaron 203 grupos para una densidad de $254 N ha^{-1}$ en un bosque de *Pseudotsuga menziesii* con presencia de *Pinus* y *Quercus*. Rubio-Camacho *et al.* (2017) llevaron a cabo un análisis desglosado por género, e identificaron un total de 213 conglomerados de *Pinus* y 193 de *Quercus* en una de las parcelas estudiadas. En la segunda parcela, se registraron 129 conglomerados de *Pinus* y 189 de *Quercus*. Esos resultados se asociaron con densidades de 242 y 211 individuos por hectárea, respectivamente. Castellanos-Bolaños *et al.* (2010) documentan entre 123 y 365 grupos para diferentes asociaciones de *Pinus-Quercus*, con excepción de la asociación dominada por *Pinus patula* Schltdl. & Cham., en la que obtuvieron 1 176 grupos.

Índice de Uniformidad de Ángulos (W_i)

El análisis general de W_i mostró que los grupos estructurales de los géneros *Pinus* y *Quercus* presentaron resultados contrastantes (Figura 5): *Pinus* con grupos estructurales presentes en los tres niveles altitudinales, mientras que *Quercus* solo en los niveles 1 y 2. Al respecto, *Quercus* registró un valor promedio de 0.545, con un intervalo de confianza (IC) de 0.498, 0.609; *Pinus* obtuvo un $W_i=0.527$ [IC, 0.493, 0.57] en el Nivel 1, aunque dicha diferencia no fue significativa. En el Nivel 2, *Pinus* ($W_i=0.53$ [IC, 0.469, 0.611]) sí tuvo una diferencia significativa ($d=0.28$

[*IC*, 0.22, 0.35], $p < 0.001$), en contraste con el grupo *Quercus* ($W_i = 0.25$ [*IC*, 0.25, 0.25]).

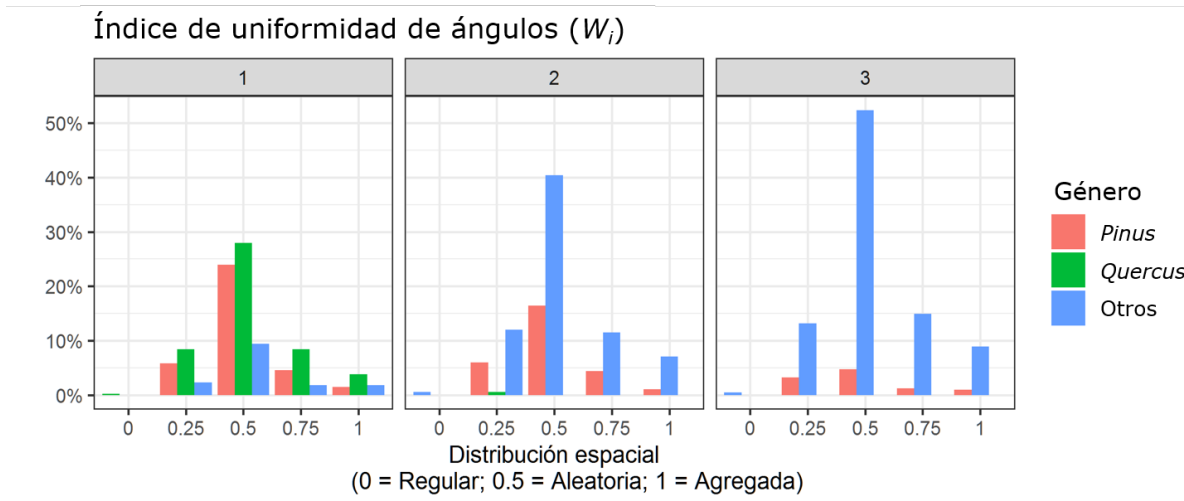


Figura 5. Índice de uniformidad de ángulos (W_i) por género y nivel altitudinal.

El análisis específico mostró que las especies de *Pinus* mantienen una media cercana a 0.50. A excepción de *P. strobiformis* en el Nivel 1, donde registró una media de 0.66 [*IC*, 0.47-0.84]. Cabe destacar que *P. engelmannii* no tuvo presencia en los sitios 2 y 3.

La misma tendencia se observó para las especies de *Quercus*, ya que las cuatro presentes tuvieron valores de uniformidad media, aunque *Q. sideroxylla* disminuyó su media a 0.25 [*IC*, 0.25-0.25]. La uniformidad media en ambos géneros indica que dos de los cuatro árboles vecinos tienen un ángulo menor a 90° respecto al árbol referencia, lo que resulta en una distribución aleatoria.

Este índice se ha aplicado en bosques bajo conservación cercanos al área de estudio, cuyos resultados señalan que tanto *Quercus* ($\bar{x} = 0.47$ [*IC*, 0.39-0.53]), como *Pinus* ($\bar{x} = 0.49$ [*IC*, 0.40-0.57]) tienen una distribución aleatoria (García-García *et al.*, 2021). De igual manera, Rubio-Camacho *et al.* (2017) en un bosque de pino-encino

documentan que el promedio para dos parcelas evaluadas es de 0.49. Graciano-Ávila *et al.* (2020) en bosques dominados por *Pinus* y *Quercus* citan la misma distribución en Durango, México.

Índice de Mezcla de Especies (M_i)

La mezcla espacial de especies también muestra resultados contrastantes entre los grupos analizados (Figura 6). En primer lugar, *Quercus* registró un valor promedio de 0.559 [IC, 0.385, 0.724], mientras que *Pinus* obtuvo un $M_i=0.545$ [IC, 0.432, 0.645] en el Nivel 1, sin diferencia significativa. En el Nivel 2, *Pinus* ($M_i=0.673$ [IC, 0.509, 0.844]) sí tuvo una diferencia significativa ($d=0.321$ [IC, 0.168, 0.493], $p<0.001$) en comparación con el grupo *Quercus* con un M_i igual a 1; ello indica que *Quercus* está rodeado de árboles de géneros distintos.

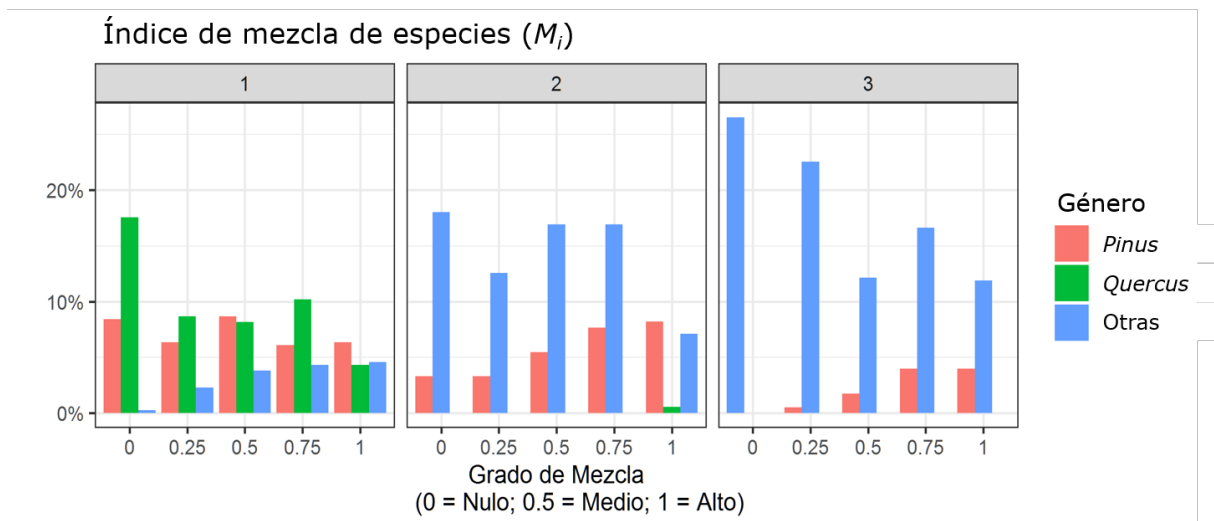


Figura 6. Índice de Mezcla de Especies (M_i) por género y nivel altitudinal.

Particularmente, las especies de *Pinus* con mayor mezcla fueron *Pinus strobiformis* (P1 \bar{x} =0.87, P2 \bar{x} =0.66 y P3 \bar{x} =0.87) y *P. durangensis* (P1 \bar{x} =0.86, P2 \bar{x} =0.85 y P3 \bar{x} =1.00), estos valores indican que la mayoría de los árboles referencia están rodeados por individuos de especies diferentes.

Contrario a lo anterior, *P. arizonica* (\bar{x} =0.45) y *P. engelmannii* (\bar{x} =0.36) presentaron menor mezcla en P1, mientras que en los niveles 2 y 3 *P. arizonica* amplió su mezcla a \bar{x} =0.66 y \bar{x} =0.71, respectivamente. *Quercus crassifolia* Bonpl. (\bar{x} =0.59), *Q. fulva* Liebm. (\bar{x} =0.73) y *Q. rugosa* Née (\bar{x} =0.68) exhibieron una mezcla de media-alta en P1, donde únicamente *Q. sideroxylla* tuvo una mezcla baja (\bar{x} =0.28); es decir, que corresponde a una especie que suele estar rodeada de individuos de su misma especie o con tendencia a agruparse.

El Índice de Mezcla de Especies (M_i) se ha evaluado en diversos bosques templados del país con predominancia de *Pinus* y *Quercus*, en los cuales se han registrado valores medios de mezcla menores a los aquí documentados, de manera que destaca la valiosa diversidad y coexistencia de especies en el bosque del presente estudio, con excepción de *P. arizonica* y *P. engelmannii* en P1, los cuales son similares o menores (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2010; Graciano-Ávila *et al.*, 2020; Silva-González *et al.*, 2022).

Índice de Dominancia Dimensional en Altura (UH_i)

La dominancia dimensional en altura evidenció que las especies de *Pinus* tiende a ser entre media y alta. El mayor valor promedio de UH_i se registró en el Nivel 1 con 0.633 [IC, 0.556, 0.705], mientras que *Quercus* tuvo 0.396 [IC, 0.305, 0.503]; estas diferencias fueron significativas ($d=0.235$ [IC, 0.108, 0.357], $p<0.01$); diferencia que se repite en el Nivel 2 ($d=0.293$ [IC, 0.204, 0.390], $p<0.001$) con *Pinus* como el género dominante con $UH_i=0.541$ [IC, 0.452, 0.632]; y en contraste *Quercus* tuvo $UH_i=0.25$ [IC, 0.25, 0.25] (Figura 7).

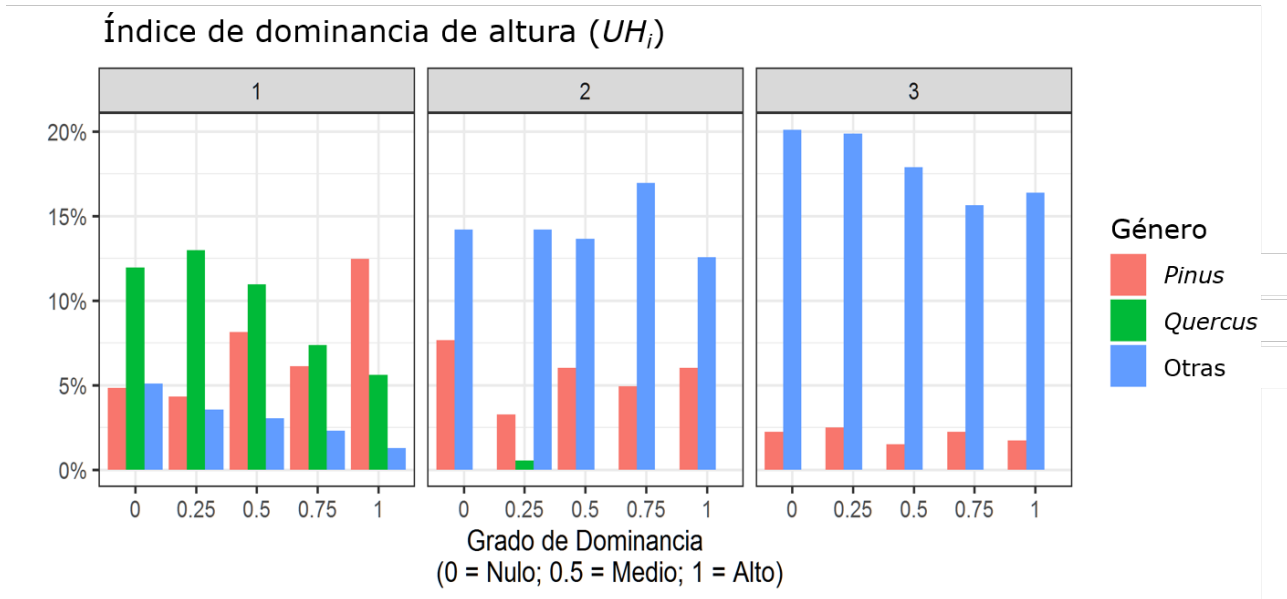


Figura 7. Distribución del Índice de Dominancia Dimensional en Altura (UH_i) de las especies de *Quercus* por nivel altitudinal.

Destaca la dominancia de *P. durangensis* que obtuvo una media de $\bar{x}=0.82$, $\bar{x}=0.52$ y $\bar{x}=0.75$ para los niveles 1, 2 y 3, respectivamente; dichos valores muestran que esta especie, cuando es árbol referencia tiende a tener alturas mayores a sus vecinos más cercanos. El resto de los taxones en los tres niveles tuvieron medias de 0.41-0.63, a excepción de *P. arizonica* que en P2 registró una media de 0.34, la cual es baja. Las especies de *Quercus* mantuvieron una tendencia a la baja, entre ellas *Q. sideroxylla* obtuvo la mayor media ($\bar{x}=0.42$) en P1, lo que mostró que regularmente esta especie tiene menor altura que sus vecinos.

Los resultados coinciden con lo citado por otros autores, quienes evaluaron también bosques templados, y señalaron que grupos estructurales dominados por *Pinus* fueron dominantes en altura (García-García *et al.*, 2021); *Quercus* tiende a rodearse de vecinos de mayor altura (Rubio-Camacho *et al.*, 2017). Se observó la

disminución en la media de los individuos de *Pinus* en los niveles 2 y 3, esto puede deberse a que en esos niveles el bosque es dominado en densidad por otros géneros como *Pseudotsuga* y *Abies* que tienden a tener individuos de mayor altura (Cuadro 1).

Conclusiones

Los resultados del análisis de los géneros *Pinus* y *Quercus* a lo largo del gradiente altitudinal indican que presentan algunas diferencias significativas en la uniformidad de ángulos y mezcla de especies en el nivel altitudinal 2, también en la dominancia dimensional en altura en los niveles 1 y 2. Esto en gran medida por la composición de especies, que también cambia con el gradiente; *Quercus* pierde presencia y dominancia a medida que la altitud aumenta. El Índice de Uniformidad de Ángulos (W_i) demostró que existe una distribución aleatoria de *Pinus* y *Quercus*, similar a otros bosques templados del país, aunque en este estudio, a mayor altitud *Pinus* presenta una tendencia a la regularidad. Esto también se refleja en la mezcla de especies (M_i); así, los individuos de *Pinus* tienden a mezclarse más con otras especies con el incremento en la altitud. Finalmente, la dominancia dimensional en altura (UH_i) expuso que las especies de *Pinus* son más altas que las de *Quercus* en todo el gradiente, característica que se observa en diversos bosques templados de México. Con este trabajo se pone de manifiesto la pertinencia de generar más información específica a nivel de especie mediante los índices utilizados.

Agradecimientos

Al personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp)-Dirección Regional Norte y Sierra Madre Occidental por el apoyo brindado para la

ejecución de este estudio en el Área de Protección de Flora y Fauna Cerro Mohinora en Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México.

Conflicto de intereses

Eduardo Alanís Rodríguez declara en su calidad de Editor de Sección, no haber participado en el proceso editorial del presente documento.

Contribución por autor

Samuel Alberto García-García, Eduardo Alanís Rodríguez y Ernesto Alonso Rubio-Camacho: idea de estudio, registro de datos, interpretación de resultados y redacción; Óscar Alberto Aguirre-Calderón y José Israel Yerena-Yamallel: revisión y análisis de datos y redacción de la Discusión; Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez y Alejandro Collantes Chávez-Costa: revisión general y redacción de Conclusiones.

Referencias

- Aguirre, O., G. Hui, K. von Gadow and J. Jiménez. 2003. An analysis of spatial forest structure using neighborhood-based variables. *Forest Ecology and Management* 183(1-3):137-145. Doi: 10.1016/S0378-1127(03)00102-6.
- Arriaga, L., J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa. 2000. *Regiones terrestres prioritarias de México*. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/terrestres.html>. (20 de octubre 2023).

- Asbeck, T., D. Kozák, A. P. Spinu, M. Mikoláš, V. Zemlerová and M. Svoboda. 2022. Tree-related microhabitats follow similar patterns but are more diverse in primary compared to managed temperate mountain forests. *Ecosystems* 25:712-726. Doi: 10.1007/s10021-021-00681-1.
- Babst, F., O. Bouriaud, B. Poulter, V. Trouet, M. P. Girardin and D. C. Frank. 2019. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances* 5(1):eaat4313. Doi: 10.1126/sciadv.aat4313.
- Cabrera, O., Á. Benítez, N. Cumbicus, C. Naranjo, ... and A. Escudero. 2019. Geomorphology and altitude effects on the diversity and structure of the vanishing montane forest of southern Ecuador. *Diversity* 11(3):32. Doi: 10.3390/d11030032.
- Castellanos-Bolaños, J. F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez y A. Velázquez-Martínez. 2010. Diversidad arbórea y estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2):39-52. Doi: 10.29298/rmcf.v1i2.636.
- Champo-Jiménez, O., L. Valderrama-Landeros y M. L. España-Boquera. 2012. Pérdida de cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, Michoacán, México (2006-2010). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(2):143-157. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.074.
- Chávez-Flores, G. A., J. J. Corral-Rivas, J. D. Vega-Nieva, P. M. López-Serrano y E. A. Rubio-Camacho. 2020. Estructura espacial de los bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(59):141-162. Doi: 10.29298/rmcf.v11i59.614.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2017. Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Cerro Mohinora. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y Conanp. Miguel Hidalgo, México D. F., México. 192 p.
- Dakhil, M. A., Q. Xiong, E. A. Farahat, L. Zhang, ... and D. Huang. 2019. Past and future climatic indicators for distribution patterns and conservation planning of

temperate coniferous forests in southwestern China. *Ecological Indicators* 107:105559. Doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105559.

Füldner, K. 1995. Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern. Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie. Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen, NI, Deutschland. 145 p.

Gadow, K. v. 1999. Waldstruktur und Diversität. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 170(7):117-122.
https://www.researchgate.net/publication/279647674_Forest_Structure_and_diversity_Waldstruktur_und_Diversitat. (21 de octubre de 2023).

Gadow, K. v., S. Sánchez O. y J. G. Álvarez G. 2007. Estructura y crecimiento del bosque. Universidad de Göttingen. Göttingen, NI, Alemania. 280 p.

Gadow, K., G. Hui und M. Albert. 1998. Das winkelmaß-ein strukturparameter zur beschreibung der individualverteilung in waldbeständen. *Centralbl Gesamte Forstwes* 115:1-9.
https://www.researchgate.net/publication/284044838_Das_Winkelmaß_-_Ein_Strukturparameter_zur_Beschreibung_der_Individualverteilung_in_Waldbestanden. (21 de octubre de 2023).

García-Arévalo, A. 2008. Vegetación y flora de un bosque relictual de *Picea chihuahuana* Martínez del norte de México. *Polibotánica* (25):45-68.
<https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/770>. (21 de octubre de 2023).

García-García, S. A., E. Alanís-Rodríguez, E. A. Rubio-Camacho, O. A. Aguirre-Calderón, E. J. Treviño-Garza y G. Graciano-Ávila. 2021. Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque de *Pseudotsuga menziesii* en Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 27(3):1-15. Doi: 10.21829/myb.2021.2732242.

Girardin, C. A. J., W. Farfan-Rios, K. Garcia, K. J. Feeley, ... and Y. Malhi. 2014. Spatial patterns of above-ground structure, biomass and composition in a network

of six Andean elevation transects. *Plant Ecology & Diversity* 7(1-2):161-171. Doi: 10.1080/17550874.2013.820806.

Graciano-Ávila, G., E. Alanís-Rodríguez, E. A. Rubio-Camacho, A. Valdecantos-Dema, ... y A. Mora-Olivo. 2020. Composición y estructura espacial de cinco asociaciones de bosques de *Pinus durangensis*. *Madera y Bosques* 26(2):1-14. Doi: 10.21829/myb.2020.2621933.

Gu, H., J. Li, G. Qi and S. Wang. 2019. Species spatial distributions in a warm-temperate deciduous broad-leaved forest in China. *Journal of Forestry Research* 31:1187-1194. Doi: 10.1007/s11676-019-00928-7.

Gutiérrez, E. e I. Trejo. 2014. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85(1):179-188. Doi: 10.7550/rmb.37737.

Hui, V. G. Y. und K. von Gadow. 2002. Das Winkelmaß: Herleitung des optimalen Standardwinkels. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 173(10):173-177. https://www.researchgate.net/publication/291116943_Das_Winkelmaß-Theoretische_überlegungen_zum_optimalen_Standardwinkel. (25 de octubre de 2023).

Jadán, O., C. Toledo, B. Tepán, H. Cedillo, ... y C. Vaca. 2017. Comunidades forestales en bosques secundarios alto-andinos (Azúay, Ecuador). *Bosque* 38(1):141-154. Doi: 10.4067/S0717-92002017000100015.

Jiménez S., M. Á. y J. Méndez G. 2021. Distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière bajo escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques* 27(3):1-14. Doi: 10.21829/myb.2021.2732117.

López-Hernández, M. I., J. Cerano-Paredes, S. Valencia-Manzo, E. H. Cornejo-Oviedo, ... y G. Esquivel-Arriaga. 2018. Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* a variables climáticas en Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical* 66(4):1580-1596. Doi: 10.15517/rbt.v66i4.32663.

Luna-Cavazos, M., A. Romero-Manzanares y E. García-Moya. 2008. Afinidades en la flora genérica de piñonares del norte y centro de México: un análisis fenético.

Revista Mexicana de Biodiversidad 79(2):449-458. Doi: 10.22201/ib.20078706e.2008.002.555.

Mair, P. and R. Wilcox. 2020. Robust Statistical Methods in R Using the WRS2 Package. Behavior Research Methods 52:464-488. Doi: 10.3758/s13428-019-01246-w.

Martínez-Calderón, V. M., M. E. Siqueiros-Delgado y J. Martínez-Ramírez. 2017. Especies del género *Quercus* (Fagaceae) presentes en el área natural protegida de Sierra Fría, Aguascalientes, México. Investigación y Ciencia 25(71):12-18. Doi: 10.33064/iycuaa201771336.

Pastorella, F. and A. Paletto. 2013. Stand structure indices as tools to support forest management: an application in Trentino forests (Italy). Journal of Forest Science 59(4):159-168. Doi: 10.17221/75/2012-JFS.

Pérez-Olvera, C. de la P. y R. Dávalos-Sotelo. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. Madera y Bosques 14(3):43-80. Doi: 10.21829/myb.2008.1431206.

Pommerening, A. 2002. Approaches to quantifying forest structures. Forestry: An International Journal of Forest Research 75(3):305-324. Doi: 10.1093/forestry/75.3.305.

Pommerening, A. and D. Stoyan. 2006. Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure. Canadian Journal of Forest Research 36(7):1723-1739. Doi: 10.1139/x06-060.

Poulos, H. M. and A. E. Camp. 2005. Vegetation-environment relations of the Chisos Mountains, Big Bend National Park, Texas. In: Gottfried, G. J., B. S. Gebow, L. G. Eskew and C. B. Edminster (Comps.). Connecting mountain islands and desert seas: biodiversity and management of the Madrean Archipelago II. United States Department of Agriculture and Forest Service and Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, United States of America. pp. 539-544.

R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing (Versión: 2023.09.1+494). R Foundation for Statistical Computing. Vienna, W, Austria. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>. (25 de octubre 2023).

Rubio-Camacho, E. A., M. A. González-Tagle, W. Himmelsbach, D. Y. Ávila-Flores, E. Alanís-Rodríguez y J. Jiménez-Pérez. 2017. Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88(1):113-121. Doi: 10.1016/j.rmb.2017.01.015.

Rubio-Camacho, E. A., M. H. K. Hesselbarth, J. G. Flores-Garnica and M. Acosta-Mireles. 2023. Tree mortality in mature temperate forests of central Mexico: a spatial approach. *European Journal of Forest Research* 142:565-577. Doi: 10.1007/s10342-023-01542-3.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2019. Modificación del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. *Diario Oficial de la Federación*, 14 de noviembre de 2019. México D. F., México. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5578808&fecha=14/11/2019. (20 de octubre 2023).

Silva-González, E., O. A. Aguirre-Calderón, E. Alanís-Rodríguez, M. A. González-Tagle, E. J. Treviño-Garza y J. J. Corral-Rivas. 2022. Evaluación del aprovechamiento forestal en la diversidad y estructura de un bosque templado en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13(71):103-132. Doi: 10.29298/rmcf.v13i71.1017.

Thakur, U., N. S. Bisht, M. Kumar and A. Kumar. 2021. Influence of altitude on diversity and distribution pattern of trees in Himalayan temperate forests of Churdhar Wildlife Sanctuary, India. *Water, Air, & Soil Pollution* 232(5):205. Doi: 10.1007/s11270-021-05162-8.

Tiwari, O. P., C. M. Sharma and Y. S. Rana. 2020. Influence of altitude and slope-aspect on diversity, regeneration and structure of some moist temperate forests of Garhwal Himalaya. *Tropical Ecology* 61:278-289. Doi: 10.1007/s42965-020-00088-4. Tropicos. 2022. Tropicos connecting the world to botanical data since 1982 (Tropicos v3.4.2). Missouri Botanical Garden. <https://www.tropicos.org/home>. (10 de octubre 2023).

Uribe-Salas, D., M. L. España-Boquera y A. Torres-Miranda. 2019. Aspectos biogeográficos y ecológicos del género *Quercus* (Fagaceae) en Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana* (126):1-19. Doi: 10.21829/abm126.2019.1342.

Villanueva-Díaz, J., E. A. Rubio-Camacho, Á. A. Chávez-Durán, J. L. Zavala-Aguirre, J. Cerano-Paredes y A. R. Martínez-Sifuentes. 2018. Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques* 24(1):1-14. Doi: 10.21829/myb.2018.2411464.



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.