



Composición y estructura espacial de cinco asociaciones de bosques de *Pinus durangensis*

Composition and spatial structure of five associations of forests of *Pinus durangensis*

Gabriel Graciano-Ávila¹, Eduardo Alanís-Rodríguez^{1*}, Ernesto A. Rubio-Camacho², Alejandro Valdecantos-Dema^{3,4}, Oscar A. Aguirre-Calderón¹, Marco A. González-Tagle¹, Eduardo Javier Treviño-Garza¹, José Javier Corral-Rivas⁵ y Arturo Mora-Olivo⁶

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

³ Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo. Valencia, España.

⁵ Universidad Juárez del Estado de Durango. Facultad de Ciencias Forestales. Durango, Durango, México.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

⁴ Universidad de Alicante. Departamento de Ecología. Alicante, España.

⁶ Universidad Autónoma de Tamaulipas. Instituto de Ecología Aplicada. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.

* Autor de correspondencia. eduardoforesal@gmail.com

RESUMEN

La estructura espacial refleja el patrón de disposición de los árboles sobre el terreno y es un elemento básico para entender la dinámica de los ecosistemas forestales. El objetivo de la presente investigación fue evaluar las características estructurales bivariadas de cinco asociaciones diferentes de bosques de *Pinus durangensis*, identificando las similitudes y diferencias en la distribución bivariada de uniformidad de ángulos, dominancia y mezcla. Los datos provienen de cinco sitios cuadrados con superficie de 2500 m², establecidos cada uno en diferentes bosques de *P. durangensis* en la Sierra Madre Occidental. Para cada sitio se determinó altura promedio, diámetro promedio y cobertura de copa, así como índices de mezcla de especies, uniformidad de ángulos y dominancia. Los índices se combinaron dos a dos para obtener tres distribuciones bivariantes. El bosque puro de *P. durangensis* presentó los individuos con mayor altura, mientras que el mayor diámetro fue para la asociación con *P. teocote*. El índice de mezcla (Mi) indica que solo en el bosque puro existe una baja mezcla de especies. El índice de uniformidad de ángulos ($W\hat{i}$) muestra que los árboles, de manera general, tienen una distribución aleatoria. Los valores de dominancia ($U\hat{i}$) muestran que en todos los sitios existen todas las clases sociales representadas de manera equitativa. Los índices y sus combinaciones describen adecuadamente la distribución espacial de los árboles y su relación con sus vecinos más cercanos. La información obtenida de la combinación de las variables estructurales contribuye a mejorar la comprensión de la estructura espacial del bosque y contribuye a la regulación de la intensidad de corta y garantizar una gestión sostenible.

PALABRAS CLAVE: dinámica de ecosistemas forestales, distribución bivariada, dominancia, mezcla, uniformidad.

ABSTRACT

The spatial structure reflects the pattern of arrangement of trees on the ground and is a basic element to understand the dynamics of forest ecosystems. The objective of the present investigation was to evaluate the bivariate structural characteristics of five different associations of *Pinus durangensis* forests, identifying the similarities and differences in the bivariate distribution of uniformity of angles, dominance and mingling. The data comes from five quadrat sites with an area of 2500 m², each established in different forests of *P. durangensis* in the Sierra Madre Occidental. For each site, the average height, average diameter and crown coverage were determined, as well as the species mingling index, angle uniformity and dominance indexes. The indices were combined two to two to obtain three bivariate distributions. The pure forest of *P. durangensis* presented individuals with higher height, while the largest diameter was found in the association with *P. teocote*. The mingling index (Mi) indicates that only in the pure forest there is a low species mingling. The uniformity angle index ($W\hat{i}$) shows that trees generally present a random distribution. The values of dominance ($U\hat{i}$) show that in all the sites there are all the social classes represented in an equitable way. The indexes and their combinations adequately describe the spatial distribution of the trees and their relationship with their closest neighbors. The information obtained from the combination of the structural variables contribute to improve the understanding of the spatial structure of the forest, and in addition to contributing to the regulation of cutting intensity and ensuring sustainable management.

KEYWORDS: forest ecosystem dynamics, bivariate distribution, dominance, mixture, uniformity.

INTRODUCCIÓN

Pinus durangensis Martínez es una de las especies del género *Pinus* más importantes en México por su área de distribución (143000 km²), calidad de madera, valor comercial y por ser componente clave para la conservación de la biodiversidad de la Sierra Madre Occidental (SMO) (Monárrez-González y Ramírez-Maldonado, 2003; Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007). Esta especie generalmente se encuentra en partes altas (por encima de 2000 m snm) de la vertiente occidental de la SMO en los estados de Durango, Sonora y Chihuahua, resaltando la región de El Salto, Durango, uno de los lugares con mayor aprovechamiento forestal del país. Forma masas puras y mezcladas sobre laderas con escasa pendiente y clima relativamente húmedo. Entre los elementos que se asocian con esta especie están *Pinus cooperi*, *P. teocote*, *P. leiophylla* y *Quercus sideroxyla* (González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González y López-Enríquez, 2012).

El aprovechamiento forestal que se ha realizado en las últimas décadas ha modificado la estructura de los bosques, por lo que su conocimiento, aunado a la dinámica de rodales, es fundamental para garantizar la sostenibilidad de estos sistemas (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008). La información sobre la estructura del bosque contribuye a una mejor comprensión de la historia y la función del bosque y del potencial de desarrollo futuro de un ecosistema forestal (Franklin *et al.*, 2002).

Hui y Pommerening (2014) mencionan que la composición y estructura son un indicador de la biodiversidad que existe dentro de los bosques. Por su parte, Del Río, Montes, Canellas, y Montero (2013) señalan que los árboles son el elemento más relevante, pues las distintas especies presentan diferentes características morfológicas y dan lugar a diferentes estructuras.

De acuerdo con Gadow (1993), Hui, Albert y Gadow (1998), Hui, Gadow y Albert, (1999) y Hui, Albert y Chen (2003), la estructura espacial de un bosque se puede representar utilizando índices basados en vecindarios (índice de uniformidad de ángulos, de mezcla de especies y de dominancia) que representan la variación a pequeña

escala de las especies arbóreas, el diámetro del árbol y los patrones de distribución en una pequeña unidad estructural. Estos índices han demostrado ser útiles para analizar la estructura espacial de los bosques mixtos (Hui *et al.*, 1998; Graz, 2006; Pommerening, 2006).

Dos de los índices estructurales se pueden combinar para obtener una distribución bivariada, que, dependiendo del índice, proporcionará información estructural sintetizada sobre la mezcla entre especies arbóreas, los patrones de distribución o la competencia entre individuos. Con esta información se pueden analizar los cambios en la estructura espacial del bosque antes y después de las intervenciones silvícolas, lo que puede ayudar a regular la intensidad de corta y garantizar un manejo sostenible (Li, 2013).

En la SMO se han realizado diferentes estudios que evalúan la composición y estructura de los ecosistemas forestales, pero son pocos para la superficie que ocupa esta cadena montañosa (Solís *et al.*, 2006; Aguirre, Hui, Gadow y Jiménez, 2003; Aragón-Piña, Garza-Herrera, González-Elizondo y Luna-Vega, 2010; Navar-Chaidez *et al.*, 2009; Wehenkel, Brazão-Protázio, Carrillo-Parra, Martínez-Guerrero y Crecente-Campo, 2015). Además, se ha evaluado escasamente la distribución espacial, limitándose sólo a distribución espacial univariada, por lo que son nulas las investigaciones que abordan la distribución espacial bivariada en esta región.

OBJETIVOS

La presente investigación tiene como objetivo evaluar las características estructurales bivariadas de cinco asociaciones diferentes de bosques de *P. durangensis*, identificando las similitudes y diferencias en la distribución bivariada de uniformidad de ángulos, dominancia y mezcla de especies, y de esta forma proporcionar una guía útil para el manejo forestal basada en la estructura en los bosques de *P. durangensis*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la región de El Salto, Durango, México, ubicada en la parte suroeste del estado, en el



macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental. Está enmarcada geográficamente entre los paralelos 23° 42' 34,48" y 23° 49' 28,18" de latitud Norte y los meridianos 105° 30' 11,83" y 105° 40' 6,56" de longitud Oeste (Fig. 1).

En el área de estudio, la altura sobre el nivel del mar varía entre 2500 m y 2900 m snm. Los tipos de suelo presentes en área son Litosol, Cambisol y Regosol con textura predominantemente gruesa a media. El tipo de roca predominante es ígnea extrusiva ácida (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015). En esta zona prevalecen climas de tipo (A)C(W2), C(W2), C(E)(M) y C(E)(W2), la precipitación promedio media anual es de 1200 mm y la temperatura es de 18 °C (INEGI, 2009). Los tipos de vegetación predominantes corresponden a formaciones naturales de bosques de pino y pino-encino.

Los datos provienen de cinco sitios en diferentes bosques de *Pinus durangensis* que fueron áreas de aprovechamiento forestal, los cuales se establecieron siguiendo la metodología desarrollada por Corral-Rivas *et*

al. (2009). Se emplearon sitios cuadrados con superficie de 2500 m² (50 m × 50 m) y fueron establecidos en el 2007 (Tabla 1, Fig. 2).

A todos los individuos registrados en los sitios se les midió el diámetro normal ($DAP \geq 7,5$ cm, altura total (h), se identificó la especie a la que pertenecía, se registró la distancia en metros y azimut en grados desde el centro del sitio.

Análisis de los datos

En cada sitio se determinó la altura promedio, diámetro promedio y la cobertura de copa, así como los índices de mezcla de especies, uniformidad de ángulos y dominancia. Para la estimación de los parámetros estructurales se utilizó el muestreo denominado "grupo estructural de los cinco árboles" el cual toma un árbol de referencia (i) y sus cuatro vecinos más cercanos (Gadow, 1993; Fuldner, 1995; Gadow, Real, Álvarez, 2001; Aguirre *et al.*, 2003; Pommerening, 2006).

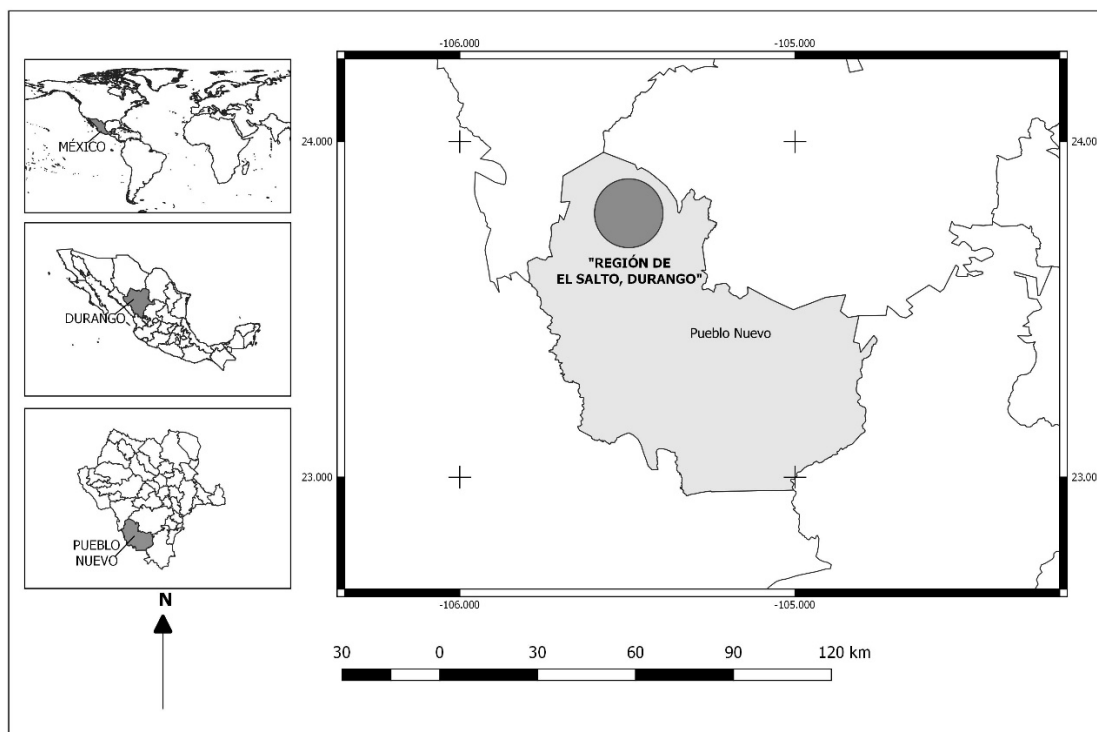


FIGURA 1. Localización del área de estudio.

TABLA 1. Características básicas de los cinco sitios.

Sitio	Bosque	Altitud	Latitud Norte	Longitud Oeste	Exposición	Pendiente	Fisiografía
a)	<i>P. durangensis</i> (puro)	2613	23°44' 39,72"	105°40' 11,13"	O	31%	Lomerío
b)	<i>P. durangensis</i> - <i>P. teocote</i>	2865	23°41'23,27"	105° 24' 13,61"	NE	12%	Ladera
c)	<i>P. durangensis</i> - <i>P. cooperi</i>	2687	23°43' 02,63"	105°36' 37,79"	SE	15%	Ladera
d)	<i>P. durangensis</i> - <i>P. strobiformis</i>	2699	23°47'27,96"	105° 25' 51,16"	Z	2%	Valle
e)	<i>P. durangensis</i> - <i>Q. sideroxyla</i>	2605	23°50' 42,78"	105° 25' 53,01"	N	31%	Ladera

O = Oeste; NE = Noreste; SE = Sureste; Z = Zenital (plano); N = Norte.

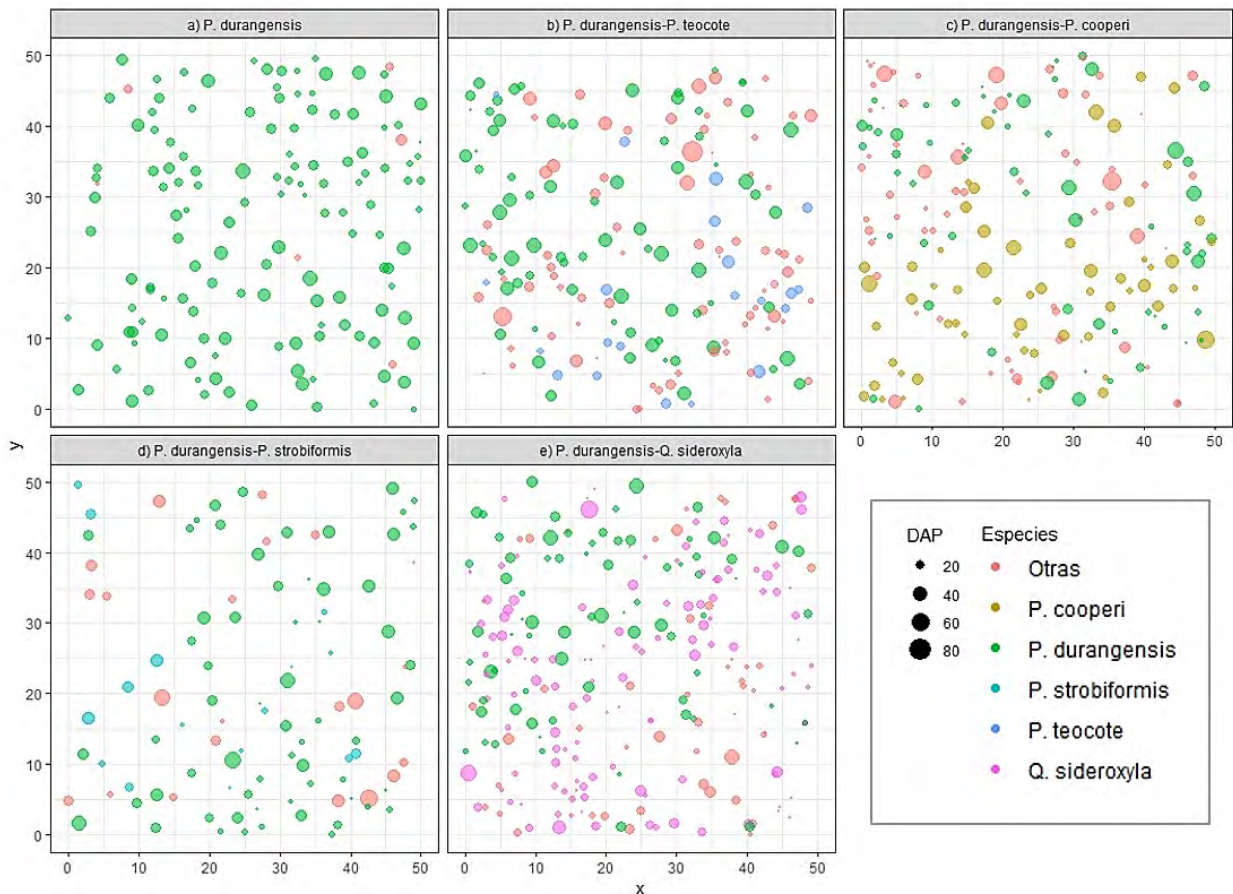


FIGURA 2. Representación de la distribución espacial del arbolado por sitio en el área de estudio. Los círculos representan los árboles, cuyo tamaño está escalado al diámetro normal ($DAP \geq 7,5$ cm).

Índice de mezcla de especies (Mi)

El grado de mezcla entre especies es una medida de la diversidad en la distribución espacial, la cual se puede estimar mediante el índice de mezcla M_i de Fuldner (1995). Éste se define como la proporción de n vecinos más cercanos que no pertenecen a la misma especie del árbol de

referencia (i). En todos los casos se toman los cuatro vecinos más cercanos.

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (1 - v_{ij})$$



Donde $0 \leq M_i \leq 1$, v_j es igual a 0 cuando el árbol j es de la misma especie que el árbol de referencia i y será 1 en caso contrario (Gadow, Sánchez y Álvarez, 2007) (Fig. 3a).

Índice de uniformidad de ángulos (W_i)

Este índice describe la regularidad o la irregularidad de la distribución del arbolado (Aguirre, 2004; Gadow *et al.*, 2007; Pommerening, 2002). Se basa en la medición de los ángulos entre los vecinos en relación a un árbol de referencia i y su comparación con un ángulo estándar α , de tal manera que al considerar cuatro vecinos al árbol de referencia W_i puede tomar valores de 0 hasta 1, donde un valor cercano a cero representa condiciones de regularidad, valores cercanos a 0.50 muestran tendencia a la aleatoriedad y los próximos a 1 presentan condiciones de agrupamiento. En este estudio se consideró un valor de referencia al ángulo estándar α , que se esperaría en una distribución regular = 72° comparado con cada α_j (Gadow, Hui y Albert, 1998; Ledo, Condés y Montes, 2012). El índice de ángulos se calcula con la siguiente ecuación (Gadow *et al.*, 1998):

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij}$$

donde:

W_i = valor del índice para el i -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 (Fig. 3b).

Índice de dominancia (U_i)

Este índice también es conocido como medida de entorno y describe la dominancia relativa de una especie en su entorno directo. Se define como la dominancia del árbol referencia i con respecto a sus 4 vecinos más cercanos, es decir, el número de árboles n más pequeños (en diámetro o altura) que el árbol de referencia.

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j$$

Donde $0 \leq U_i \leq 1$ y v_j será igual a 1 si el árbol j es menor al árbol referencia i , y 0 en caso contrario (Fig. 3c).

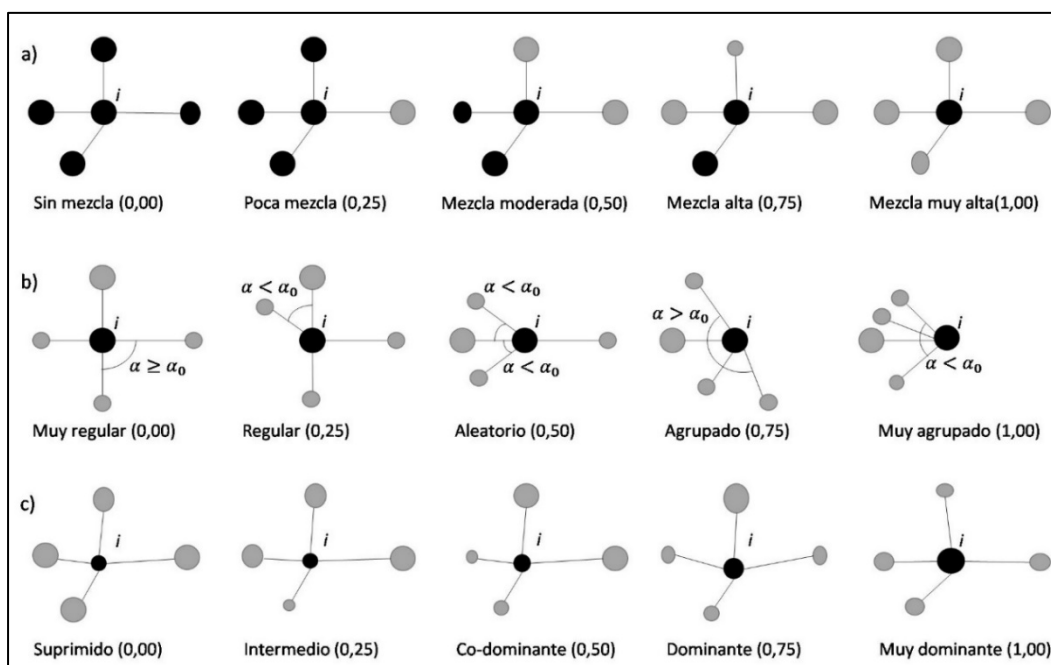


FIGURA 3. Representación esquemática de los índices estructurales de mezcla (a) uniformidad de ángulos (b) y dominancia (c).

Cuando el índice de uniformidad de ángulos (W_i), mezcla de especies (M_i) y dominancia (U_i) no se combinan, sólo pueden proporcionar una característica de la estructura del bosque. Estos tres parámetros son inherentemente independientes y tienen los mismos cinco valores y frecuencias (0,00, 0,25, 0,50, 0,75, y 1,00). Pero también se pueden combinar dos a dos para obtener tres distribuciones bivariantes (W_i-M_i , W_i-U_i y M_i-U_i) y así representar las características estructurales espaciales de los bosques (Li, 2013).

Para evitar el efecto de borde se utilizó el estimador NN1, el cual consiste en omitir como árbol de referencia (i) a aquéllos cuya distancia a su j -ésimo vecino más cercano sea menor a la distancia entre éste y el borde del sitio. No obstante, esto no los elimina para formar parte de otros índices.

Para el cálculo de los diversos índices se usó el programa CRANCOD v 1.4 (Pommerening, 2012), así como adaptaciones de algunos scripts para el programa R (R Development Core Team, 2018).

RESULTADOS

Los cinco sitios estudiados presentan diferente cantidad de árboles y composición de especies, el sitio “a” es más puro, presentando 140 árboles en total, de los cuales 134 (96%) corresponden a la especie *P. durangensis*. La proporción de esta especie disminuyó en los siguientes sitios. El sitio “b” presenta 175 individuos en total, de los cuales 77 (44%) son de *P. durangensis* y 22 (13%) de *P. teocote*. El sitio “c” presenta 191 árboles, 63 (33%) son de *P. durangensis* y 60 (31%) de *P. cooperi*. En el sitio “d” se registraron 100 árboles con proporciones de *P. durangensis* de 62 (62%) y 16 (16%) de *P. strobiformis*. Por otro lado, en el sitio “e” se registraron 249 individuos, la especie *Q. sideroxylla* tuvo una presencia de 115 árboles (46%) mientras que *P. durangensis* que reportó 74 (30%). En todos los sitios se presentaron otras especies, las cuales de forma unitaria fueron de menor proporción (Fig. 4).

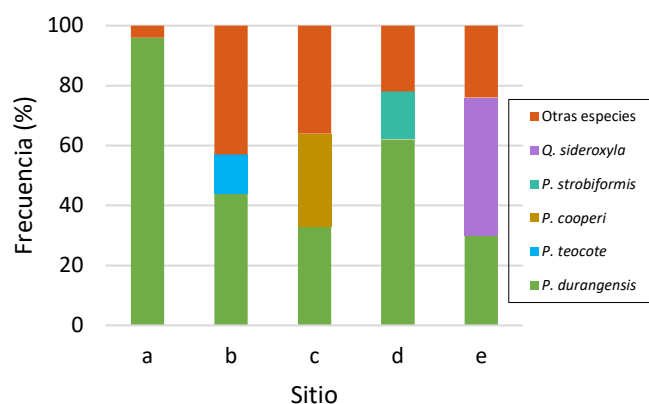


FIGURA 4. Frecuencia de especies por sitio.

El sitio de bosque puro de *P. durangensis* presentó la mayor altura promedio (18 ± 3 m) en comparación con las asociaciones con otras especies (Tabla 2). Así, en el bosque mixto de *P. durangensis-Q. sideroxylla* se presentó el valor promedio de altura más bajo de todas las asociaciones ($12 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$). En relación con el diámetro promedio, el sitio de *P. durangensis-P. teocote* presentó el mayor valor, mientras que el sitio de *P. durangensis-Q. sideroxylla* exhibió el valor de *DAP* más bajo de todas las asociaciones. Sin embargo, esta asociación de *P. durangensis-Q. sideroxylla* fue la que mostró valores más altos de cobertura (superiores a 100% y, por tanto, de solapamiento de copas). En el lado opuesto, el sitio de *P. durangensis-P. strobiformis* mostró la cobertura más baja, que no llegó a 75% (Tabla 2).

Índices estructurales

Los resultados del índice de mezcla (M_i) indican que existe una baja mezcla de especies en el sitio de bosque puro de *P. durangensis*, mientras que en el resto de los sitios la mezcla aumenta considerablemente al asociarse con diferentes especies (Tabla 3) a excepción de asociación *P. durangensis-P. strobiformis* que mantiene un bajo grado de mezcla. El índice de uniformidad de ángulos (W_i) muestra que los árboles de manera general en todos los sitios tienen una distribución aleatoria, pues los valores obtenidos se encuentran alrededor de 0,50. Para la dominancia (U_i) los



valores indican que en los cinco sitios existen todas las clases sociales representadas de manera equitativa, es decir, presentan heterogeneidad de dimensiones diamétricas. Valores cercanos a 0,50 corresponden a la clasificación codominante (Kraft, 1884) indicando que dos de los vecinos son más grandes que el árbol de referencia.

En los cinco sitios los valores máximos de frecuencia $Wi-Mi$ en todas las especies se ubicaron en $Wi = 0,50$ y disminuyeron hacia ambos lados, sin embargo, el sitio “a” presentó la mayor frecuencia (35%). Esto indica que la mayoría de los árboles se encuentran distribuidos de forma aleatoria con una regularidad y agrupamiento mínimo o nulo. Por otro lado, el grado de mezcla se comportó de forma diferente, siendo el sitio “a” el que presentó menor mezcla ($Mi = 0$) al tratarse de un bosque más puro. En el resto de los sitios el grado de mezcla aumentó gradualmente sobre el eje $Wi = 0,50$. Esto indica que el primer sitio está compuesto por árboles con un bajo nivel de mezcla y alto grado de segregación de especies con una distribución

aleatoria. Los bosques mixtos pertenecen a áreas más heterogéneas con menor grado de segregación y con distribución aleatoria.

Al analizar solo los árboles de *P. durangensis* se observa que también se distribuyen en su mayoría de forma aleatoria con un grado de mezcla menor sólo en el sitio “a” ($Wi = 0,5$ y $Mi = 0$), el cual presenta la mayor frecuencia de distribución aleatoria y sin mezcla (35%), en los otros sitios esta frecuencia disminuyó, siendo mayor en distribución aleatoria y mezcla moderada ($Wi = 0,5$ y $Mi = 0,5$). Para el caso de las asociaciones, en el sitio “b” se observa que una frecuencia elevada de árboles de *P. teocote* (27%) que tienden al agrupamiento con una mezcla muy alta ($Wi = 0,75$ y $Mi = 1$). Para el caso de los demás sitios las especies asociadas se presentan distribuidas de forma aleatoria y con un grado de mezcla alto ($Wi = 0,5$ y $Mi = 0,75$) (Fig. 5).

Distribución bivariada de los índices de uniformidad de ángulos (Wi) y dominancia (Ui).

TABLA 2. Altura, diámetro promedio (\pm desviación estándar) y cobertura total de las cinco asociaciones de *P. durangensis*.

Asociación	Altura $\pm \sigma$ (m)	DAP $\pm \sigma$ (cm)	Cobertura (%)
<i>P. durangensis</i>	18 \pm 3	22 \pm 8	82
<i>P. durangensis-P. teocote</i>	13 \pm 5	23 \pm 11	97
<i>P. durangensis-P. cooperi</i>	15 \pm 7	20 \pm 11	97
<i>P. durangensis-P. strobiformis</i>	14 \pm 5	21 \pm 10	74
<i>P. durangensis-Q. sideroxylla</i>	12 \pm 5	17 \pm 8	>100

TABLA 3. Media \pm desviación estándar (σ) de los índices estructurales por sitio (mezcla de especies, uniformidad de ángulos y dominancia).

Asociación	Índice		
	Uniformidad (Wi)	Mezcla (Mi)	Dominancia (Ui)
<i>P. durangensis</i>	0,52 \pm 0,21	0,09 \pm 0,22	0,51 \pm 0,35
<i>P. durangensis-P. teocote</i>	0,51 \pm 0,19	0,66 \pm 0,30	0,52 \pm 0,36
<i>P. durangensis-P. cooperi</i>	0,49 \pm 0,19	0,63 \pm 0,31	0,51 \pm 0,36
<i>P. durangensis-P. strobiformis</i>	0,50 \pm 0,19	0,53 \pm 0,35	0,50 \pm 0,37
<i>P. durangensis-Q. sideroxylla</i>	0,48 \pm 0,18	0,59 \pm 0,30	0,50 \pm 0,36

Distribución bivariada de los índices de uniformidad de ángulos (Wi) y mezcla (Mi)

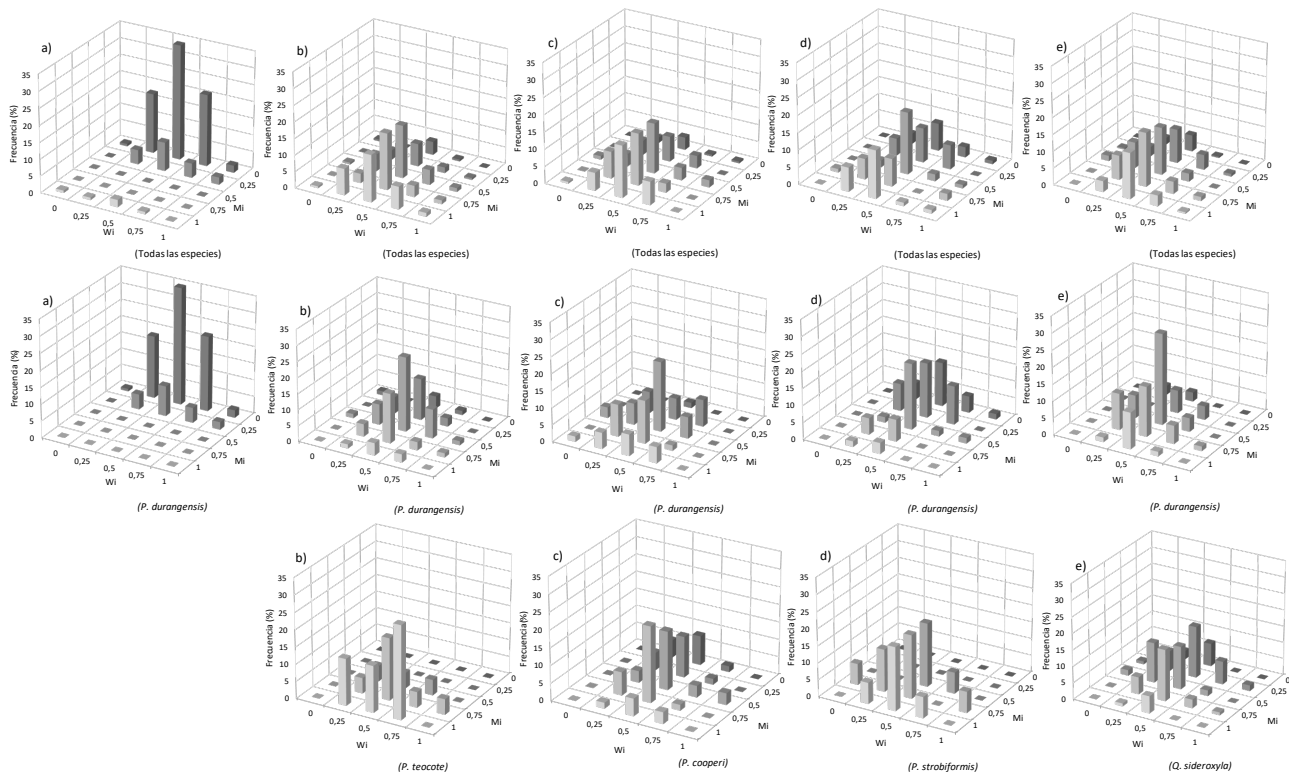


FIGURA 5. Distribución bivariada de uniformidad de ángulos y mezcla de especies.

Los valores máximos de frecuencia W_i-U_i para todas especies en los cinco sitios convergieron en el mismo eje ($W_i = 0,50$), presentando una distribución aleatoria y disminuyendo gradualmente en ambos lados hasta ubicarse en $W_i=0$ y $W_i=1$ independientemente del tipo de bosque presente. Por otro lado, en el eje de dominancia (U_i) los valores fueron muy similares en todas las categorías de todos los sitios, es decir existen todas las clases presentes de forma equitativa desde árboles suprimidos hasta muy dominantes. Sin embargo, en el sitio “b” existe mayor frecuencia de individuos que son dominantes (13%), mientras que en el “c” existe mayor frecuencia de suprimidos (14%), en el “d” codominantes (18%) y en el “e” dominantes (15%). Es decir, los árboles presentan una distribución aleatoria sin importar el estatus dominante.

Los individuos de *P. durangensis* presentan una distribución aleatoria ($W_i = 0,50$) pero existe una heterogeneidad de dimensiones con valores de frecuencias similares de U_i . Los valores máximos de frecuencia ($\geq 16\%$)

se ubicaron en $U_i = 1$ en todos los sitios salvo en el sitio “c” ($U_i = 0,5$), lo que indica que *P. durangensis* en los sitios “a”, “b”, “d” y “e” es muy dominante sobre las demás especies asociadas. *P. cooperi* y *P. strobiformis* que son codominantes (19%), mientras que *P. teocote* y *Q. sideroxylla* suelen ser intermedios (18% y 17%) (Fig. 6).

Distribución bivariada de los índices de mezcla (Mi) y dominancia (Ui)

La distribución bivariada $Mi-U_i$ de todas las especies se comportó de forma diferente en todos los sitios (Fig. 7). Para el caso del sitio “a” la mayor frecuencia se ubicó en la combinación $U_i = 0,75$ y $Mi = 0$, indicando que hay más individuos que son dominantes y que están rodeados de árboles que son de la misma especie (19%), por lo que la mezcla de especies es muy baja o nula. El sitio con mayor frecuencia de árboles dominantes y con mayor mezcla, es el sitio “c” ($U_i = 1$ y $Mi = 0$) con (7%). Sólo en “d” y “e” existe mayor frecuencia de árboles suprimidos rodeados de árboles de diferentes especies (9% y 7%) por lo que se encuentran totalmente mezclados ($U_i = 0$ y $Mi = 1$).

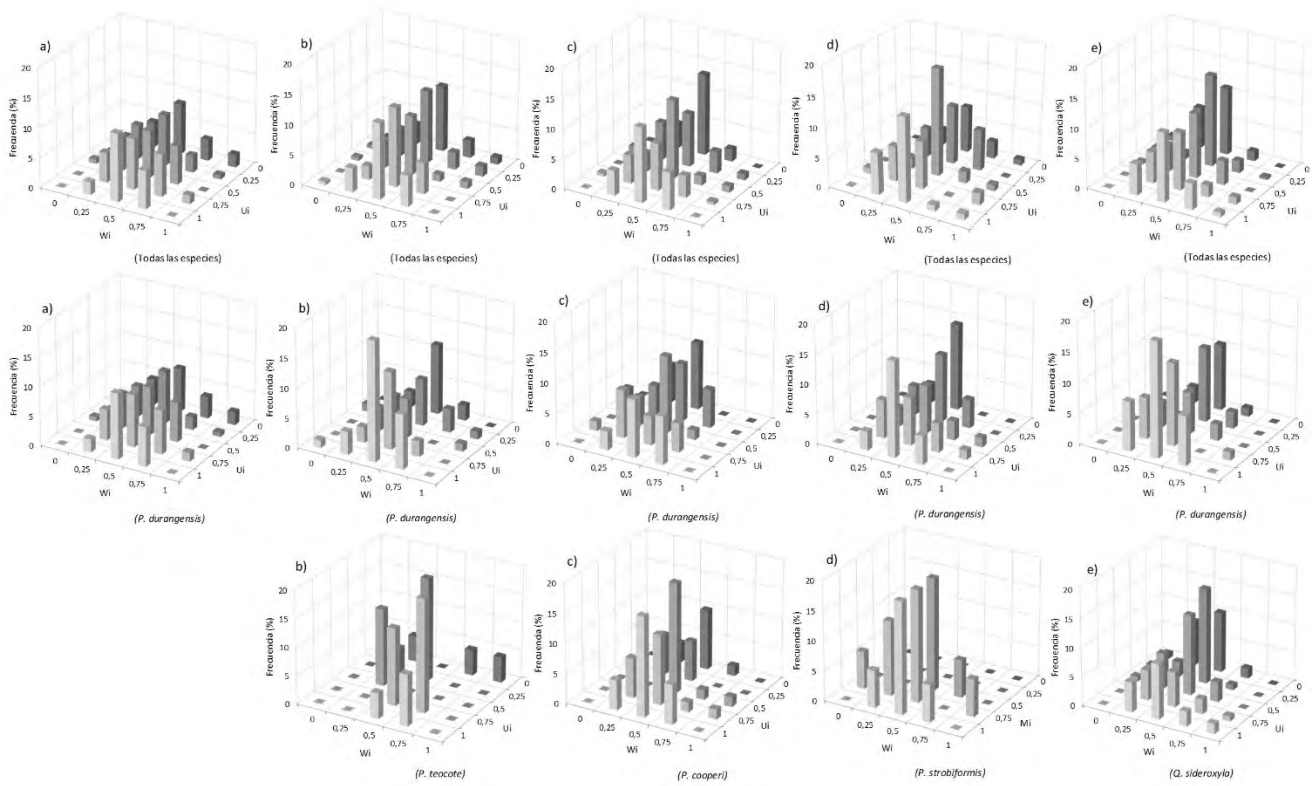


Figura 6. Distribución bivariada de uniformidad de ángulos y dominancia.

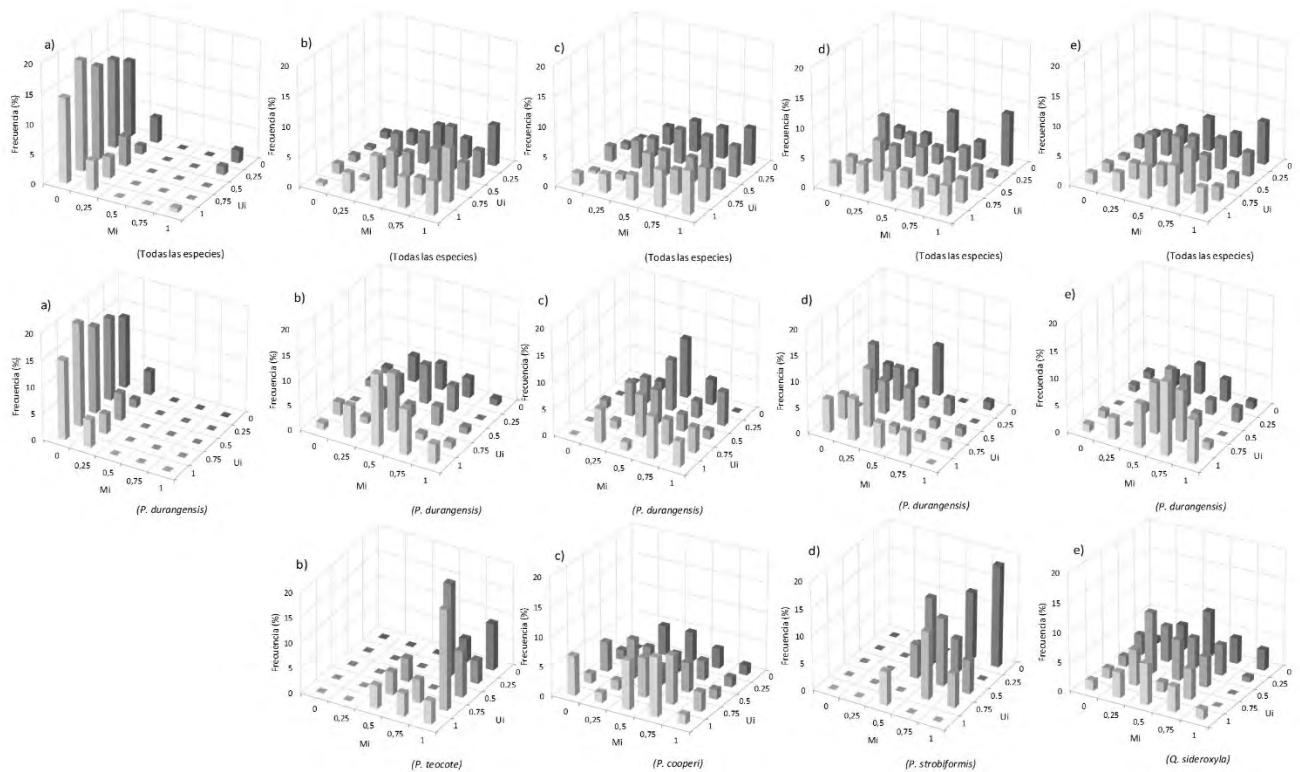


Figura 7. Distribución bivariada de mezcla de especies y dominancia.

P. durangensis suele estar presente en todas las clases desde árboles suprimidos hasta los muy dominantes, como en el sitio “a” donde se presentan valores de frecuencia muy similar en todas las categorías y una mezcla casi nula. Llama la atención el sitio “b” donde la mayor proporción de los árboles (14%) tienden a la dominancia y mezcla moderada ($U_i = 1$ y $M_i = 0,50$). Por el contrario, en el sitio “c” la mayor frecuencia (11%) es de árboles suprimidos y mezcla moderada ($U_i = 0$ y $M_i = 0,50$). Otro caso particular fue el del sitio “e” donde la mayor frecuencia de árboles (14%) dominantes y un grado de mezcla alta ($U_i = 1$ y $M_i = 0,75$).

P. durangensis resulta ser la especie dominante en casi todos los sitios, presentado una mezcla media cuando se encuentra asociada con *P. teocote*. Sin embargo, cuando se asocia con *P. cooperi*, y, en menor medida, *P. strobiformis*, la dominancia de *P. durangensis* disminuye notablemente y la mezcla aumenta considerablemente (Fig. 7).

DISCUSIÓN

En el análisis de los cinco tipos de bosque que se estudiaron, se encontró que el sitio de bosque puro de *P. durangensis* tiene los individuos con mayor altura, mientras que el mayor diámetro lo presenta la asociación con *P. teocote*. Por otro lado, la asociación de *P. durangensis* con *Q. sideroxylla* posee la mayor cobertura de área de copa, siendo el único caso en el que se produjo un solapamiento de copas. En general, las copas de los pinos tienen menor área de cobertura y su forma es cilíndrica y por tanto consistente con la copa de latifoliadas, propias de los bosques de encinos (Yirdaw y Luukkanen, 2004).

En la presente investigación, los parámetros estructurales se consideraron estrechamente asociados con la relación entre la mezcla, la diferenciación de tamaños y los patrones de distribución entre cada individuo y sus cuatro árboles vecinos adyacentes.

Los valores de U_i-W_i y M_i-W_i de la distribución bivariada de *P. durangensis* en asociación con otras especies revelaron que en los cinco sitios estudiados se muestra mayor frecuencia de árboles con distribución aleatoria ($W_i = 0,50$) y pocas veces el grupo estructural de los cinco árboles presenta conespecificidad, a excepción del bosque

puro. En este bosque los árboles de *P. durangensis* suelen ser los dominantes, aunque de manera general existe presencia de todas las clases sociales equitativamente en todas sus asociaciones (sitios con presencia de árboles suprimidos hasta árboles muy dominantes). Estas características indican que las diferentes asociaciones de especies arbóreas presentan alta heterogeneidad. Diversos estudios señalan que la distribución aleatoria se da principalmente en bosques naturales o que han sufrido mínimas perturbaciones (Hui y Gadow 2003; Hui, Gadow, Hu y Xu, 2007). Zhang *et al.* (1999) mencionan que durante el proceso de sucesión hasta el estado clímax, la comunidad forestal cambia gradualmente de agrupada a regular y el proceso está constantemente acompañado de un debilitamiento aleatorio de las asociaciones interespecíficas entre las especies dominantes. En México se han realizado estudios que registran bosques con distribución aleatoria en áreas que sufrieron intervenciones silvícolas (Aguirre *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2005). Por otro lado, la heterogeneidad en los bosques se da debido a la competencia de las plantas conespecíficas por los recursos, y a las pioneras que en algunos bosques producen las condiciones necesarias, como sombra y refugio, para que otras especies crezcan, se establezcan y, después de varias etapas de sucesión, se logra que otras especies diferentes coexistan y ocupen los nichos ecológicos disponibles (Pommerening, 2002; Li, Hui, Zhao y Hu, 2012).

Los valores máximos de U_i-M_i y W_i-M_i alcanzaron un alto grado de mezcla (a excepción del bosque puro), registrándose mayores frecuencias de mezcla alta ($M_i = 0,75$) y muy alta ($M_i = 1$). En general *P. durangensis* se mezcla moderadamente ($M_i = 0,50$) en las asociaciones con otras especies, aunque al asociarse con *Q. sideroxylla* su grado de mezcla y dominancia se elevan considerablemente y la distribución se mantiene aleatoria. Por otro lado, al asociarse con *P. teocote*, esta última se presenta con mayor grado de mezcla ($M_i = 1$), con una dominancia alta ($U_i = 0,75$) y con tendencia al agrupamiento ($W_i = 0,75$). Según Wright (2002) la tendencia al agrupamiento es común en los bosques con árboles de dominancia alta. Es de señalar que en las áreas naturales protegidas es donde se han registrado



mayores valores de mezcla (Corral *et al.*, 2005), disminuyendo en áreas que han sufrido algún tipo de alteración como incendios o actividades silvícolas (Rubio-Camacho *et al.*, 2017; Solís *et al.*, 2006).

Los valores de U_i - W_i y U_i - M_i mostraron que en todos los sitios se presentan todas las clases de dominancia diamétrica. No obstante, casi todas las especies tienden a ser dominantes ($U_i = 0,75$) y muy dominantes ($U_i = 1$). *P. durangensis* se mantiene como la especie con mayor dominancia en las diferentes asociaciones, aunque al asociarse con *P. cooperi* esta dominancia disminuye a costa del aumento de la de *P. cooperi* que, a su vez, presenta una mezcla alta con una distribución aleatoria. Al asociarse con *P. strobiformis*, esta última se presenta con mayor frecuencia de árboles suprimidos, con una mezcla muy alta y con una distribución aleatoria. Algunos investigadores señalan que los patrones de distribución aleatorios en los árboles dominantes se deben a una fuerte competencia intra e interespecífica por los recursos (luz, agua, nutrientes) (He y Duncan, 2000; Boyden, Binkley y Shepperd, 2005; Druckenbrod, Shugart, y Davies, 2005). Existen diferentes estudios que han registrado resultados similares, donde los individuos dominantes presentan distribución aleatoria (Condit *et al.*, 2000; Wiegand, Jeltsch y Ward, 2000; Salas, LeMay, Núñez, Pacheco y Espinosa, 2006).

En los bosques de México la información respecto al análisis de las características estructurales bivariadas es prácticamente nula. Sin embargo, en diferentes regiones boscosas se han realizado otros estudios que evalúan estas características de forma univariada y han registrado valores similares. En uniformidad de ángulos Rubio-Camacho *et al.* (2017) registraron una distribución aleatoria con valores de $W_i = 0,49$ al analizar los patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. Respecto a la mezcla Castellanos-Bolaños *et al.* (2008), encontraron valores promedios de $M_i = 0,56$ al analizar la estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Con relación a la dominancia Ávila *et al.* (2012) registró valores de $U_i = 0,49$ al caracterizar de los patrones de distribución espacial y

dimensional en un bosque de *Pinus hartwegii* (Lindl.) de la Sierra Madre Oriental.

La información aquí obtenida puede ser extrapolada a áreas adyacentes de la unidad muestral y ser utilizada en función del objetivo del plan de manejo forestal, ya que si por ejemplo se busca mantener la diversidad de especies y distribución aleatoria, será necesario promover el desarrollo del bosque hacia una mezcla de especies más alta, donde los árboles con mezcla baja serían los que se talarían o en caso de que los objetivos sean meramente de producción se talarían aquellos árboles que estén suprimidos, agrupados y con alto nivel de mezcla, esto para promover el crecimiento en diámetros de los árboles de la masa forestal y favorecer a la especie de interés comercial, todo esto dependiendo del producto que se busque obtener.

CONCLUSIONES

La presente investigación logró proporcionar información sintetizada de las características estructurales bivariadas (mezcla entre especies arbóreas, patrones de distribución y competencia entre individuos) de cinco asociaciones diferentes de *Pinus durangensis*, lo cual está estrechamente relacionado con la fase de desarrollo de los rodales estudiados.

De manera general se presenta una distribución aleatoria en todos los sitios, lo cual es un indicador del estado de sucesión existente en el área de estudio, donde *P. durangensis* en su mayoría, es la especie de mayor relevancia, presentando mayor altura y mayor diámetro, pero que al asociarse con otras especies modifica considerablemente la estructura del bosque. De esta forma el bosque de *P. durangensis*-*P. teocote* presenta una dominancia muy alta, una mezcla alta y una elevada tendencia al agrupamiento, lo cual solo difiere en la distribución aleatoria que mantiene el bosque de *P. durangensis*-*P. cooperi*. Por su parte el bosque de *P. durangensis*-*P. strobiformis* tiende a ser diferente en la amplia presencia de árboles suprimidos que en él coexisten, mientras que la asociación de *P. durangensis*-*Q. sideroxylla* mantuvo la dominancia alta, presentando un solapamiento de copas, situación que no ocurrió en las otras asociaciones.

La información obtenida de la combinación de las variables estructurales ayuda a mejorar la comprensión de la estructura espacial del bosque, y además de contribuir a la regulación de la intensidad de corta y garantizar una gestión sostenible, también puede apoyar el desarrollo de planes de investigación, conservación y uso sustentable de los recursos forestales.

REFERENCIAS

- Aguirre, O. A., Hui, G., Gadow, K., & Jiménez, J. (2003). An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management*, 183(1), 137-145. doi: 10.1016/S0378-1127(03)00102-6
- Aguirre, O. (2004). Índices para la caracterización del estrato arbóreo de ecosistemas forestales. *Revista Ciencia Forestal en México*, 27(92), 5-27.
- Aragón-Piña, E. E., Garza-Herrera, A., González-Elizondo, M. S., & Luna-Vega, I. (2010). Composición y estructura de las comunidades vegetales del rancho El Duranguense, en la Sierra Madre Occidental, Durango, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(3), 771-787. doi: 10.22201/ib.20078706e.2010.003.648
- Ávila, D. Y., González, M. A., Jiménez, J., Aguirre, O. A., Treviño, E. J., & Vargas, L. B. (2012). Evaluación de la estructura espacial post-incendio de rodales de *Pinus hartwegii* utilizando parámetros de vecindad en la Sierra Madre Oriental, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15, 377-387.
- Boyden, S., Binkley, D., & Shepperd, W. (2005). Spatial and temporal patterns in structure, regeneration, and mortality of an old-growth ponderosa pine forest in the Colorado Front Range. *Forest Ecology and Management*, 219(1), 43-55. doi: 10.1016/j.foreco.2005.08.041
- Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M., & López-Aguillón, R. (2008). Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 14(2), 51-63. doi: 10.21829/myb.2008.1421212
- Condit, R., Ashton, P. S., Baker, P., Bunyavechewin, S., Gunatilleke, S., Gunatilleke, ... y Yamakura T. (2000). Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science*, 288(1), 1414-1418. doi: 10.1126/science.288.5470.1414
- Corral J. J., Aguirre, O. A., Jiménez J. & Corral S. (2005). Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el bosque mesófilo de montaña "El Cielo", Tamaulipas, México. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 14:217-228. [http://www.inia.es/gcontrec/pub/217-228-\(30_0S\)-Un_analisis_1162281437750.pdf](http://www.inia.es/gcontrec/pub/217-228-(30_0S)-Un_analisis_1162281437750.pdf)
- Corral-Rivas, J. J., Vargas, L. B., Wehenkel, C., Aguirre C. O., Álvarez, G. J., & Rojo, A. A. (2009). *Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango*. Durango, México: Editorial UJED.
- Del Río, M., Montes, F., Canellas, I., & Montero, G. (2003). Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(1), 159-176.
- Druckenbrod, D. L., Shugart, H. H., & Davies, I. (2005). Spatial pattern and process in forest stands within the Virginia piedmont. *Journal of Vegetation Science*, 16 (1), 37-48. doi: 10.1111/j.1654-1103.2005.tb02336.x
- Franklin, J. F., Spies, T. A., Van Pelt, R., Carey, A. B., Thornburgh, D.A., Berg, D.R., ..., & Chen, J. (2002). Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *Forest Ecology and Management*, 155, 399-423. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00575-8
- Füldner, K. (1995). Zur Strukturbeschreibung in Mischbeständen. *Forstarchiv*, 66, 149-161.
- Gadow, K., Hui, G., & Albert, M. (1998). Das Winkelmaß – ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Waldbeständen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 115, 1-9.
- Gadow, K. V., Sánchez, O. S., & Álvarez, J. G. (2007). *Estructura y crecimiento del bosque*. Göttingen, Alemania: Universidad de Göttingen.
- Gadow, K. V., Real, P., & Álvarez, G. J. (2001). *Modelización del Crecimiento y la evolución de los bosques*. Vienna, Austria: IUFRO (International Union of Forest Research Organization) World Series, 11.
- Gadow, K. (1993). Zur bestandesbeschreibung in der forsteinrichtung. *Forst und Holz*, 48(21), 602-606.
- Gómez-Mendoza, L. & Arriaga, L. (2007). *Modeling the Effect of Climate Change on the Distribution of Oak and Pine Species of Mexico*. *Conservation Biology*, 21(6), 1545-1555. doi: 10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botanica Mexicana*, 100, 351-403. doi: 10.21829/abm100.2012.40
- Graz, F. P. (2006). Spatial diversity of dry savanna woodlands. *Biodiversity Conservation*, 15(4), 1143-1157. doi: 10.1007/s10531-004-3105-6



- He, F. & Duncan, R. P. (2000). Density-dependent effects on tree survival in an oldgrowth Douglas fir forest. *Journal of Ecology*, 88(4), 676-688. doi: 10.1046/j.1365-2745.2000.00482.x
- Hui, G. Y. & Gadow, K. V. (2003). *Quantitative analysis of forest spatial structure*. Beijing, China: China Science and Technology Press.
- Hui, G. Y., Albert, M., & Chen, B. W. (2003). Reproduktion der Baumverteilung im Bestand unter Verwendung des Strukturparameters Winkelmaß. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 174, 109-116. Recuperado de https://www.sauerlaender-verlag.com/CMS/uploads/media/AFJZ174__05-06__2003.pdf
- Hui, G. Y., Albert, M., & Gadow, K. V. (1998). Das Umgebungsmab als parameter zur Nachbildung von bestandesstrukturen. *Forstwissenschaft Centralblatt*, 117(1-6), 258-266. doi: 10.1007/BF02832980
- Hui, G. Y., Gadow, K. V., & Albert, M. (1999). The neighborhood pattern—a new structure parameter for describing distribution of forest tree position. *Scientia Silvae Sinicae*, 35, 37-42. Recuperado de http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDIOTAL-LYKE901.005.htm
- Hui, G. Y., Gadow, K. V., Hu, Y. B., & Xu, H. (2007). *Structure-based forest management*. Beijing, China: China Forestry Press.
- Hui, G. Y. & Pommerening, A. (2014). Analysing tree species and size diversity patterns in multi-species uneven-aged forests of Northern China. *Forest Ecology and Management* 316, 125-138. doi: 10.1016/j.foreco.2013.07.029
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2015). *Carta topográfica. Escala 1:50,000 F13-A18*. El Salto, Durango, Mexico: Inegi.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2009). *Cartas temáticas del estado de Durango*. Aguascalientes, México: Inegi.
- Kraft, G. (1884). *Beiträge zur lebre von den durchforstungen, schlagstellungen und lichtungshieben*. Hannover, Alemania: Verlag Keind-worth.
- Ledo, A., Condés, S., & Montes, F. (2012). Revisión de índices de distribución espacial usados en inventarios forestales y su aplicación en bosques tropicales. *Revista Peruana de Biología*, 19(1), 113-124. doi: 10.15381/rpb.v19i1.799
- Lí, Y. (2013). *The bivariate distribution of forest stand spatial structural parameters*. China: Chinese Academy of Forestry.
- Lí, Y., Hui, G., Zhao, Z., & Hu, Y. (2012). The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest. *Journal of Vegetation Science*, 23(6), 1180-1190. doi: 10.1111/j.1654-1103.2012.01431.x
- Martínez-Antúnez, P., Wehenkel, C., Hernández-Díaz, J. C., González-Elizondo, M., Corral-Rivas, J. J., & Pinedo-Álvarez, A. (2013). Effect of climate and physiography on the density of trees and shrubs species in Northwest Mexico. *Polish Journal of Ecology*, 61(2), 283-295.
- Monárrez-González, J. C. & Ramírez-Maldonado, H. (2003). Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus durangensis* Mtz. en el estado de Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 45-56. Recuperado de https://chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?section=article&id_articulo=387&doi=1111
- Návar, C. J. J. y González, G. S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, 27, 71-87.
- Pommerening, A. (2002). Approaches to quantifying forest structures. *Forestry*, 75(3), 305-324. doi: 10.1093/forestry/75.3.305
- Pommerening, A. (2006). Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis. *Forest Ecology and Management*, 224(3), 266-277. doi: 10.1016/j.foreco.2005.12.039
- R Core Team (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de <https://www.R-project.org/>.
- Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M. A., Himmelsbach, W., Ávila-Flores, D. Y., Alanís-Rodríguez, E., & Jiménez-Pérez, J. (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
- Salas, P. C., LeMay, V., Núñez, P., Pacheco, A., & Espinosa, A. (2006). Spatial patterns in an old-growth *Nothofagus obliqua* forest in south-central Chile. *Forest Ecology and Management*, 231 (1-3), 38-46. doi: 10.1016/j.foreco.2006.04.037
- Solís, M. R., Aguirre, O. A., Treviño, E. J., Jiménez, J., Jurado, E., & Corral-Rivas, J. (2006). Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 12(2), 49-64. doi: 10.21829/myb.2006.1221242
- Wehenkel, C., Brazão-Protázio, J. M., Carrillo-Parra, A., Martínez-Guerrero, J. H., & Crecente-Campo, F. (2015). Spatial Distribution Patterns in the Very Rare and Species-Rich *Picea chihuahuana* Tree Community (Mexico). *PLOS ONE*, 10(10), e0140442. doi: 10.1371/journal.pone.0140442
- Wiegand, K., Jeltsch, F., & Ward, D. (2000). Do spatial effects play a role in the spatial distribution of desert-dwelling *Acacia raddiana*?. *Journal of Vegetation Science*, 11 (4), 473-484. doi: 10.2307/3246577
- Wright, J. S. (2002). Plant diversity in tropical forests: A review of mechanisms of species coexistence. *Oecologia*, 130(1), 1-14. doi: 10.1007/s004420100809

Yirdaw, E. & Luukkanen, O. (2004). Photosynthetically active radiation transmittance of forest plantation canopies in the Ethiopian highlands. *Forest Ecology and Management*, 188(1-3), 17-24. doi: 10.1016/j.foreco.2003.07.024

Zhang, J., Chen, L., Guo, Q., Nie, D., Bai, X., & Jiang, Y. (1999). Research on changes of dominant tree population distribution patterns during developmental processes of a climax forest community. *Acta Phytocol*, 23, 256–268.

Manuscrito recibido el 19 de febrero de 2019

Aceptado el 20 de septiembre de 2019

Publicado el 23 de abril de 2020

Este documento se debe citar como:

Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Rubio-Camacho, E. A., Valdecantos-Dema, A., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Corral-Rivas, J. J., & Mora-Olivo, A. (2020). Composición y estructura espacial de cinco asociaciones de bosques de *Pinus durangensis*. *Madera y Bosques*, 26(2), e2621933. doi: 10.21829/myb.2020.2621933



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.