

Estructura espacial y composición de especies arbóreas en rodales bajo dos tratamientos silvícolas en la Sierra Madre Occidental

Spatial structure and tree species composition in forest stands under two silvicultural treatments in the Sierra Madre Occidental

Gabriel Graciano-Ávila ^{1,2}  • Ernesto Alonso Rubio-Camacho ³  • Eduardo Alanís-Rodríguez ² 
 • José Javier Corral-Rivas ⁴  • Samuel Alberto García-García ⁵ 

Recibido: 19/12/2024

Aceptado: 17/06/2025

Abstract

Structural diversity can be analyzed through different indices to know the effect of forestry on stands and tree species composition. The purpose of this study was to characterize the spatial structure and species composition of the tree layer under two silvicultural treatments in the Sierra Madre Occidental (seed trees or regeneration treatment and selection treatment). The information was obtained from 31 quadrangular plots of 2,500 m². All trees that had a normal diameter larger than or equal to 7.5 cm were recorded. Each tree was identified to species level, and we recorded the diameter at breast height (cm), the total height (m), the azimuth (°) and the distance (m) to the center of the plot were measured. The density (N), basal area (G), degree of aggregation, mingling of the species, size differentiation and dominance were determined. A total of 12 and eight tree species were recorded for the regeneration and selection treatments respectively. The highest density occurred in the selection and basal area in the regeneration treatments. The diameter distributions showed an inverted J distribution in both treatments. The spatial distribution of the trees was different in both treatments; in the selection treatment the trees tend to be distributed more evenly, while in the regeneration treatment they tend to group. The selection treatment showed a tendency to produce purer stands. In both treatments there was low differentiation in diameters and heights. This study indicates that the residual spatial structure of these forested areas may vary depending on the treatment applied, and provides essential information for both science and sustainable forest management.

Keywords: Temperate forests, neighborhood indices, species mixture index, parent tree method, selection method.

1. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de El Salto; El Salto, Durango, México; gabri.e.l@hotmail.com
2. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León; Linares, Nuevo León, México; eduardoforestal@gmail.com
3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco; Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México; rubio.ernesto@inifap.gob.mx
4. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango; Durango, México; jcorral@ujed.mx
5. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Cd. Delicias, Chihuahua, México; Alberto_Garcia23@outlook.com

Resumen

La diversidad estructural puede ser analizada a través de diferentes índices para conocer el efecto del aprovechamiento forestal sobre los rodales y especies arbóreas. El propósito del presente estudio fue caracterizar la estructura espacial y composición de especies del estrato arbóreo bajo dos tratamientos silvícolas en la Sierra Madre Occidental (corta de árboles padre o regeneración y corta de selección). La información se obtuvo de 31 sitios cuadrangulares de 2500 m². Se registraron todos los árboles que tenían un diámetro normal mayor o igual a 7.5 cm; se identificó la especie, se midió el diámetro normal (cm), altura total (m), azimut (°) y distancia (m) al centro del sitio. Se determinó la densidad (N), área basal (G), grado de agregación, mezcla de especies, diferenciación de tamaño y dominancia. Se registraron doce y ocho especies de árboles para los tratamientos de regeneración y selección, respectivamente. La mayor densidad se presentó en selección y área basal en regeneración. Las distribuciones diamétricas mostraron una distribución de J invertida en ambos tratamientos. La distribución espacial del arbolado resultó diferente en ambos tratamientos; en el de selección los árboles tienden a distribuirse más uniformemente, mientras que en el de regeneración tienden a formar grupos. El tratamiento de selección mostró una tendencia a producir rodales más puros. En ambos tratamientos se presentó baja diferenciación en diámetros y alturas. El trabajo realizado indica que la estructura espacial residual de estas áreas boscosas puede ser diferente en función al tratamiento utilizado y aporta información fundamental para la ciencia y el manejo forestal sustentable.

Palabras clave: Bosques templados, índices de vecindad, índice de mezcla de especies, método de árboles padre, método de selección.

Introducción

El manejo forestal busca optimizar el uso sostenible de los recursos forestales, equilibrando el aprovechamiento económico y la conservación de los ecosistemas. Mediante la aplicación de tratamientos silvícolas, es posible influir en la estructura y composición de los rodales, modificando aspectos como la composición de especies, la distribución espacial y la complejidad estructural. Dependiendo de la intensidad, temporalidad y objetivos, sus efectos pueden variar desde la creación de rodales coetáneos con menor heterogeneidad estructural, hasta el fomento de estructuras más complejas que promuevan la biodiversidad y la resiliencia del ecosistema [1], [2].

La complejidad estructural de los bosques, entendida como la variación en la disposición espacial y vertical

de los árboles, se asocia con niveles más altos de biodiversidad y resiliencia [1], [2]. En este contexto, algunos tratamientos, como las cortas selectivas o la tala rasa, se han vinculado a una reducción en la diversidad de especies y a cambios significativos en la estructura del arbolado. Sin embargo, estudios recientes también han señalado que, cuando se aplican de manera adecuada, estos tratamientos pueden preservar la diversidad y garantizar la provisión de bienes y servicios ecosistémicos futuros [3], [4], [5].

El análisis de la estructura y composición de los bosques se ha convertido en una herramienta fundamental para la planificación de programas de manejo, conservación y restauración ecológica. Evaluar parámetros como la distribución espacial y los índices de diversidad permite comprender los impactos de las prácticas de manejo forestal y diseñar estrategias que promuevan la sostenibilidad de los ecosistemas [6], [7], [8], [9]. Esto resulta particularmente relevante en regiones como la Sierra Madre Occidental de México, donde los bosques templados naturales están sujetos a diferentes enfoques de manejo.

En este sentido, comparar bosques manejados con aquellos sin intervención ha permitido identificar cómo los tratamientos silvícolas afectan la estructura y diversidad en los rodales. Métodos basados en índices de diversidad y en la caracterización de patrones espaciales han demostrado ser efectivos para evaluar las interacciones entre las características de los árboles y monitorear las variaciones en la estructura del bosque a lo largo del tiempo [9], [10], [11], [12], [13].

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar la estructura espacial y la composición de especies arbóreas en bosques templados bajo manejo forestal. En particular, se analizan dos tratamientos silvícolas: el tratamiento de árboles padre, identificado como "regeneración", y el tratamiento de cortas de selección, referido como "selección". Estos análisis contribuirán a comprender los efectos del manejo forestal en la Sierra Madre Occidental y a promover prácticas que equilibren la conservación de la biodiversidad con los objetivos productivos del manejo forestal.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en bosques templados localizados al Sudoeste del estado de Durango (Noroeste de México). La elevación sobre el nivel del mar está entre los 2 600 y los 2 845 m. El clima predominante en el área es mayormente templado, con precipitaciones en verano. La precipitación promedio

anual oscila entre 443 y 1 452 mm y la temperatura promedio anual entre 8 y 26 °C [14].

Evaluación en campo

La información se obtuvo de 31 sitios de muestreo de 2 500 m² de tamaño (50 m x 50 m) establecidos en el otoño de 2007, los cuales se establecieron siguiendo la metodología desarrollada por [15]. Los sitios se encontraban en áreas bajo manejo forestal, 19 ubicados en zonas bajo el tratamiento de árboles padre, que para este estudio es llamado tratamiento de regeneración, mientras que 12 se ubicaron en áreas de cortas de selección.

En los sitios de muestreo se registraron todos los árboles que presentaron un diámetro normal (a una altura de 1,3 m sobre el nivel del suelo) mayor o igual a 7,5 cm. Cada ejemplar se identificó taxonómicamente y se le midió el diámetro normal (cm), altura total (m) y el azimut (°) y distancia (m) del centro del sitio de muestreo.

Selección de sitios

De cada sitio de muestreo se obtuvo el área basal por hectárea (G), el número de árboles por hectárea (N) y el índice de complejidad estructural siguiendo la metodología descrita por [16]. Con base en estas tres características se realizó el análisis clúster utilizando el algoritmo de clasificación no supervisada k-means del paquete "Stats" de R [17], que genera grupos con características similares.

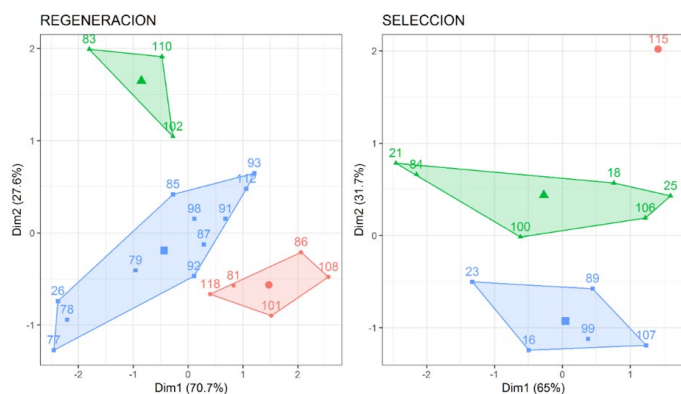


Figura 1. Clasificación de los sitios de muestreo para los tratamientos de regeneración y selección utilizando el método "k-means" con base en el índice de complejidad estructural, el número de árboles por hectárea y el área basal por hectárea.

Figure 1. Classification of sampling sites for the regeneration and selection treatments using the "k-means" method based on the structural complexity index, the number of trees per hectare and the basal area per hectare.

Para ambos tratamientos se generaron tres clústers que agrupan los sitios con mayor similitud (figura 1). Con base en ello se seleccionaron tres sitios por tratamiento pertenecientes al mismo clúster que, además, compartieran la especie dominante. En el caso del tratamiento de regeneración los sitios fueron el 85, el 87 y el 92, cuya especie dominante es *Pinus durangensis* Martínez. Mientras que, para el tratamiento de selección, los sitios 18, 25 y 84 fueron los elegidos, cuya especie dominante es *Pinus cooperi* (Martínez) C.E. Blanco.

Análisis de datos

Para el estudio se analizó la densidad como el número de árboles por hectárea (N) y el área basal (G) (ecuación 1) por especie y tratamiento.

$$G = \left(\frac{3,1416}{4} \right) * (dap)^2 \quad (1)$$

Donde: G es el área basal del árbol (m²) y dap es el diámetro del árbol (m).

Además, se analizaron las relaciones de vecindad y la diversidad espacial a través del método de muestreo de los cinco árboles, desarrollado para evaluar los atributos estructurales de los árboles que forman una masa forestal [18]. Para cada grupo estructural se determinó lo siguiente:

Índice de Uniformidad de Ángulos (Wi)

Describe los patrones de agregación de los árboles [19]. Se obtiene comparando un ángulo de referencia (90°) y presenta valores de 0, 0,25, 0,50, 0,75 y 1,00. Se calcula con la ecuación 2 [18].

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (2)$$

Donde: W_i = valor del índice para el j -ésimo árbol referencia, n = número de árboles vecinos considerados, $j = 1 \dots n$ árboles vecinos y W_{ij} = variable es igual a 1 cuando el j -ésimo ángulo α entre dos árboles vecinos próximos es menor o igual al ángulo de referencia, en caso contrario toma un valor de 0.

Índice de mezcla de especies (Mi)

Es una medida de la diversidad en la distribución espacial de especies [18], el cual se define como la proporción de n vecinos más cercanos que no pertenecen a la misma especie que el árbol de referencia, en este caso se toman los cuatro vecinos más cercanos. Se puede estimar mediante la ecuación 3 [20].

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

Donde: $0 \leq M_i \leq 1$, $V_j = 0$ cuando el árbol j es de la misma especie que el árbol de referencia i y será 1 en caso contrario, n = número de árboles vecinos considerados y $j = 1 \dots n$ árboles vecinos.

Índice de Diferenciación Dimensional (T_i)

Este índice permite describir la heterogeneidad de la estructura del ecosistema, teniendo como base las relaciones dasométricas de las especies próximas [21]. En este caso se utilizó para diámetros y alturas. Un valor de cero corresponde a una situación donde los árboles presentan la misma dimensión; el valor se incrementa al aumentar la diferencia media del tamaño de los árboles vecinos [18]. El índice se describe con la ecuación 4. El grado de diferenciación en diámetros y alturas se clasificó en cinco categorías, de 0-0,2 = débil; 0,2-0,4 = moderada; 0,4-0,6 = clara; 0,6-0,8 = fuerte; 0,8-1,0 = muy fuerte [22].

$$T_i = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\min(d_{\min i}, d_{\min j})}{\max(d_{\min i}, d_{\min j})} \quad (4)$$

Donde: T_i = grado de diferenciación en diámetro y/o en altura, n = número de vecinos considerados, i = árbol de referencia, $j = 1 \dots n$ árboles vecinos, $d_{\min i}$ = diámetro o altura del árbol i y $d_{\min j}$ = diámetro o altura del árbol j .

Índice de Dominancia (U_i)

Hace referencia a la dominancia del árbol referencia i con respecto a sus vecinos más cercanos, es decir la proporción de los n vecinos más cercanos de un árbol de referencia, dado que son más pequeños (en diámetro o altura) que dicho árbol. El índice de dominancia es muy útil cuando se desea ver la dominancia relativa de una especie en particular [18]. Para este estudio se utilizó dominancia para diámetros (UD_i) y alturas (UH_i), el grado de dominancia se clasificó en 0 = nulo, 0.5 = medio y 1 = alto [22]. El índice de dominancia se calcula con la ecuación 5.

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j \quad (5)$$

Donde: $0 \leq U_i \leq 1$, n = número de vecinos considerados, $j = 1 \dots n$ árboles vecinos y $v_j = 1$ si el árbol j es menor al árbol referencia i y 0 en caso contrario.

Con el fin de evitar el efecto de borde, se empleó el estimador NN1, el cual implica excluir como árbol de referencia (i) aquellos cuya distancia al vecino más cercano (j) sea menor que la distancia al borde del área. Sin embargo, esta exclusión no impide que estos árboles sean considerados en otros cálculos de índices [23].

Cuadro 1. Especies, número de árboles por hectárea (N) y área basal por hectárea (G), por tratamiento.

Table 1. Species, number of trees per hectare (N) and basal area per hectare (G), by treatment.

Especie	Tratamiento			
	Regeneración		Selección	
	N	G	N	G
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	1,33	0,02	-	-
<i>Alnus jorullensis</i> Kunth	5,33	0,74	-	-
<i>Arbutus madrensis</i> S.González	10,67	0,51	-	-
<i>Arbutus tessellata</i> P.D.Sørensen	9,33	0,32	-	-
<i>Juniperus deppeana</i> Steud	1,33	0,01	33,33	0,46
<i>Juniperus durangensis</i> Martínez	1,33	0,01	-	-
<i>Pinus cooperi</i> (Martínez) C.E. Blanco	8,00	0,08	533,33	11,45
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	301,33	11,80	56,00	1,49
<i>Pinus strobiformis</i> Engelm	28,00	0,90	20,00	0,78
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	26,67	1,60	-	-
<i>Quercus rugosa</i> Née	5,33	0,28	2,67	0,47
<i>Quercus sideroxyla</i> Bonpl.	36,00	2,17	45,33	1,29
<i>Arbutus bicolor</i> S. González, M. González & P.D. Sørensen	-	-	1,33	0,01
<i>Pinus teocote</i> Schied. ex Schltdl. & Cham.	-	-	4,00	0,04
Total	434,67	18,45	696,00	15,99

Los índices anteriores se estimaron con el software R [17]. Para evitar violar los supuestos de normalidad, la media y sus intervalos de confianza, se calcularon a través de simulaciones bootstrap. Estas simulaciones incluyeron a todos los grupos estructurales generados a partir de los cinco árboles vecinos. Asimismo, para los contrastes estadísticos entre tratamientos se utilizó el método de los percentiles de la distribución bootstrap, para dos muestras independientes mediante la función pb2gen [24].

Resultados

Se registraron 14 especies en el área de estudio. *Alnus firmifolia* Fernald, *Alnus jorullensis* Kunth, *Arbutus madrensis* S.González, *Arbutus tessellata* P.D.Sørensen y *Juniperus durangensis* Martínez sólo se encontraron en el tratamiento de regeneración, mientras que *Arbutus bicolor* S. González, M. González & P.D. Sørensen y *Pinus teocote* Schied. ex Schltdl. & Cham. Kunth se presentaron únicamente en el tratamiento de selección, las demás especies se registraron en ambos tratamientos. En el tratamiento de regeneración se registraron 434,67 n ha⁻¹ con un área basal total de 18,45 m² ha⁻¹, distribuidos en 12 especies; la más abundante y con mayor área basal, fue *P. durangensis*, seguida por *Quercus sideroxyla* Bonpl. En el tratamiento de selección se registraron 696 n ha⁻¹ con un área basal total de 15,99 m² ha⁻¹, distribuidos en ocho especies, siendo *Pinus cooperi* (Martínez) C.E.

Blanco la especie con los mayores valores en densidad y área basal, seguida por *P. durangensis* (cuadro 1).

Referente a las distribuciones diamétricas, en ambos tratamientos se presentó una distribución de frecuencias de tipo J invertida, es decir, existe mayor cantidad de árboles en las categorías diamétricas menores y conforme aumenta la categoría en diámetro el número de árboles disminuye. Sin embargo, en el tratamiento de selección, se observó mayor densidad de árboles en las clases diamétricas menores, con una disminución abrupta de densidad a medida que el diámetro incrementa. Para el caso del tratamiento de regeneración, la mayor densidad también se encontró en las clases diamétricas menores, pero con disminución gradual de densidad de árboles a medida que el diámetro se incrementa (figura 2).

En la figura 3 se presenta la distribución espacial del arbolado de tres sitios con tratamiento de regeneración y tres sitios con tratamiento de selección.

El valor promedio del índice de uniformidad Gadow (Wi), para el tratamiento de regeneración fue de 0,51, con un intervalo del 95 % de confianza [0,503, 0,529], mientras que para el tratamiento de selección fue de 0,47 [0,463, 0,483]. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas con un valor de $p < 0,001$, una diferencia de 0,042 y su intervalo confianza [0,028, 0,058]. En las distribuciones por frecuencias la categoría más

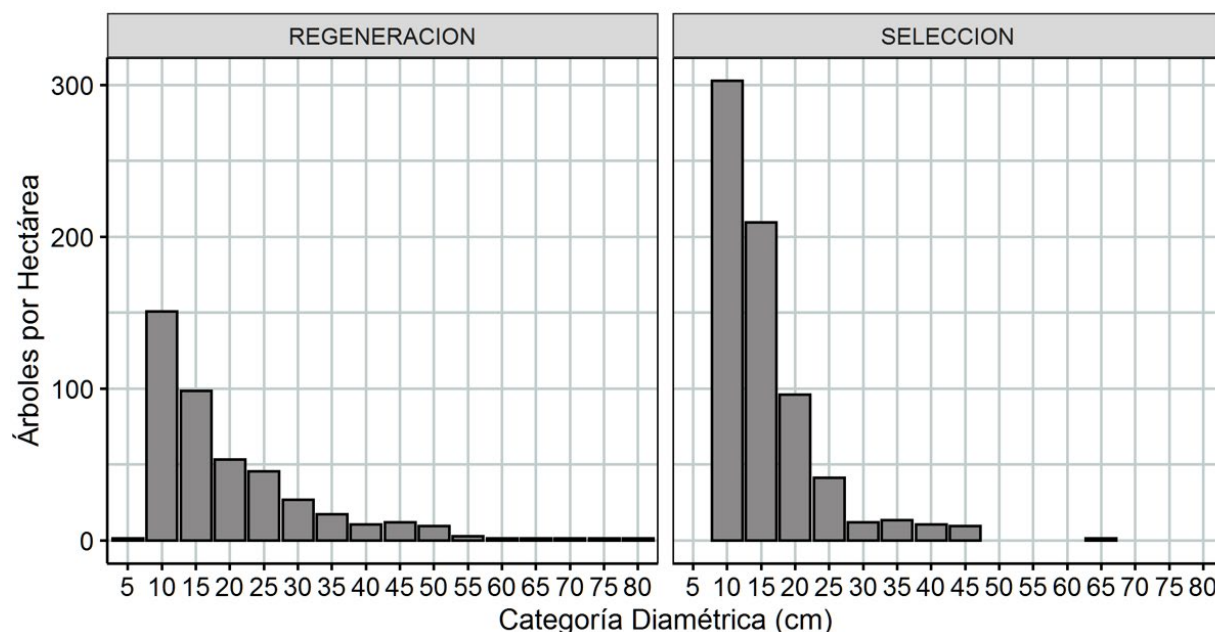


Figura 2. Distribuciones diamétricas por tratamiento.

Figure 2. Diametric distributions by treatment.

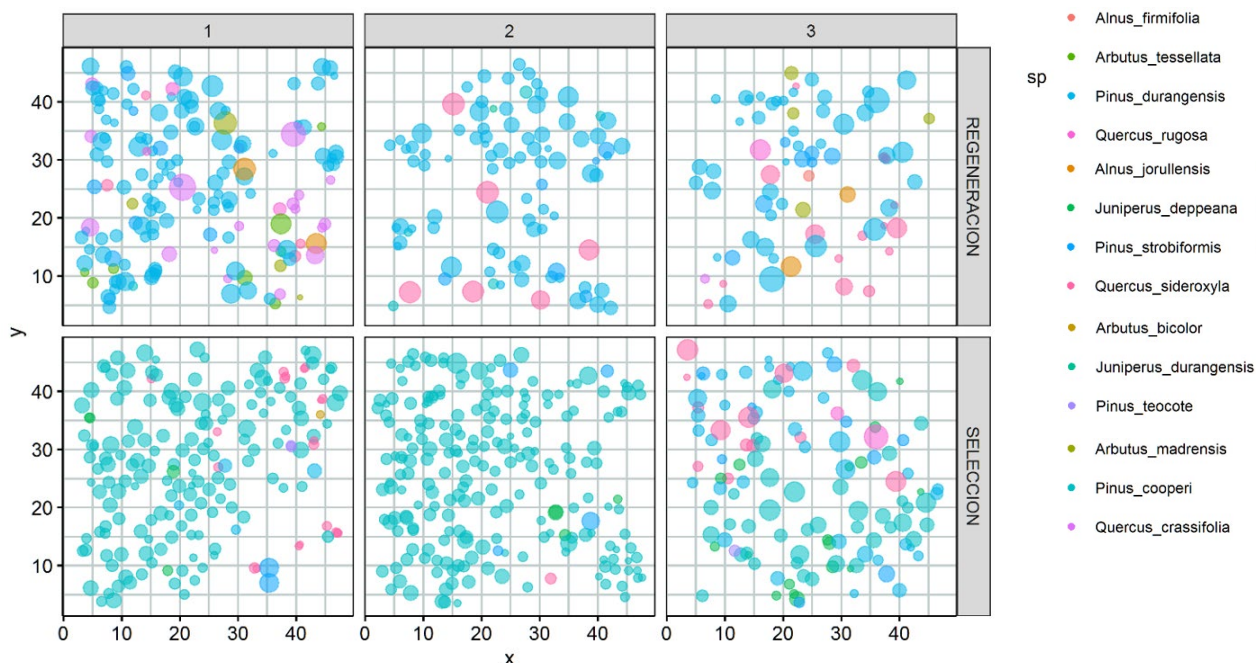


Figura 3. Distribución espacial del arbolado por sitio de 2500 m² (50 x 50 m) y tratamiento; los ejes “x” y “y” indican la distancia en metros. Los círculos representan el tamaño de los árboles, escalado al diámetro. Cada color indica una especie diferente.

Figure 3. Spatial distribution of trees per 2,500 m² site (50 x 50 m) and treatment; The “x” and “y” axes indicate the distance in meters. The circles represent the size of the trees, scaled to the diameter. Each color indicates a different species.

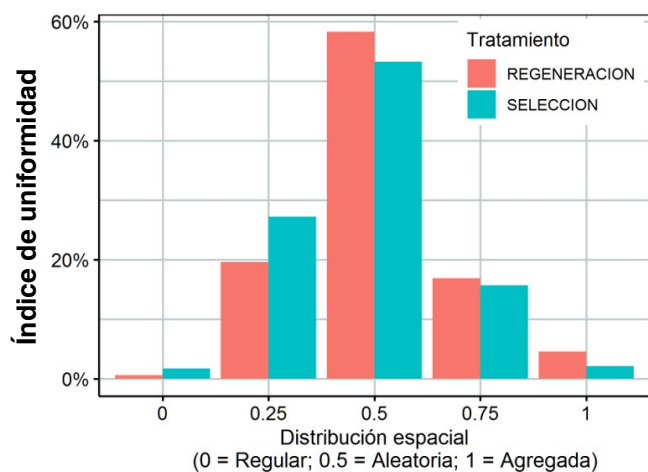


Figura 4. Distribución de frecuencias del índice de uniformidad de ángulos de Gadown (W_i) para los dos tratamientos.

Figure 4. Frequency distribution of the Gadown angle uniformity index (W_i) for the two treatments.

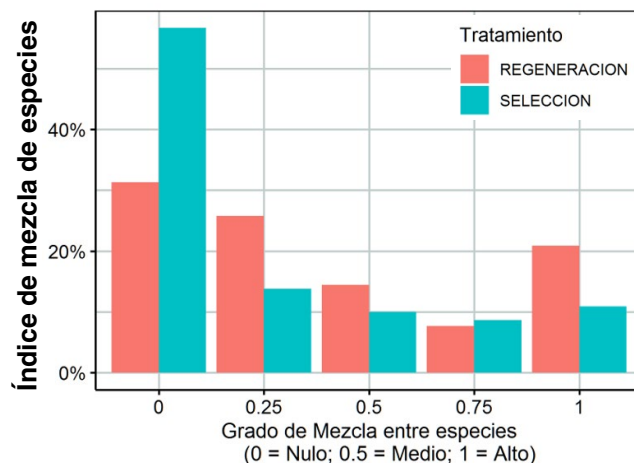


Figura 5. Distribución de la frecuencia de los valores del índice de mezcla de especies de Gadown (M_i) en los tratamientos evaluados.

Figure 5. Frequency distribution of the values of Gadown's species mingling index (M_i) in the evaluated treatments.

representada fue la aleatoria con más del 50 % de los individuos en los dos tratamientos (figura 3 y 4).

El valor promedio del índice de mezcla (M_i) para el tratamiento de regeneración fue de 0,40, con un intervalo del 95 % de confianza [0,318, 0,485], mientras

que para el tratamiento de selección fue de 0,31 [0,08, 0,647]. Estas diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas. Sin embargo, en el tratamiento de regeneración menos del 35 % de individuos muestreados se encuentra en la categoría 0, lo que indica que solo esos están rodeados por cuatro

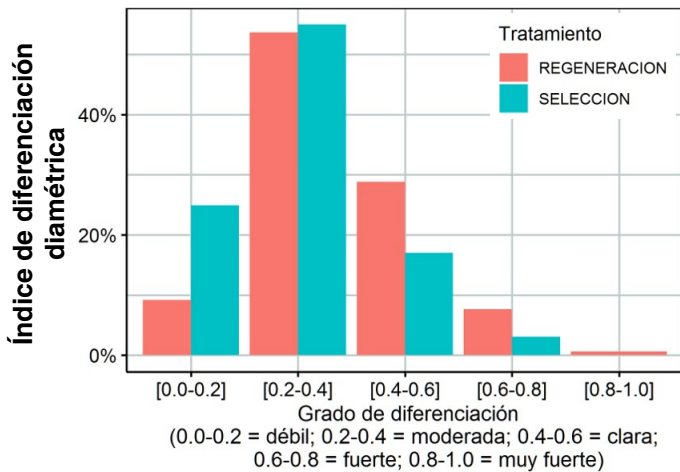


Figura 6. Grado de diferenciación diamétrica (*TDi*) por tratamiento.

Figure 6. Degree of diameter differentiation (*TDi*) by treatment.

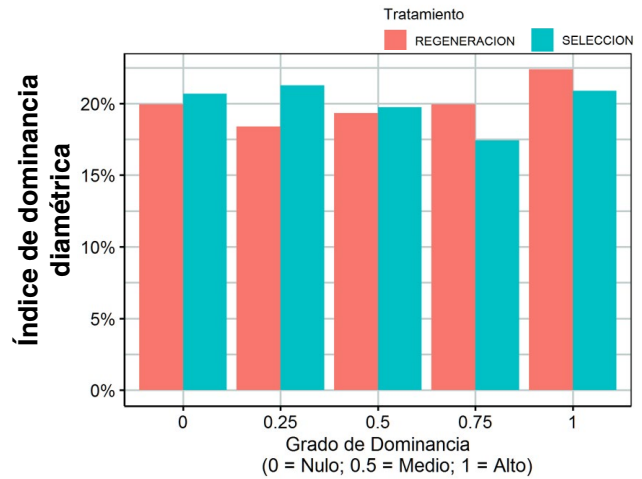


Figura 8. Grado de dominancia en diámetros (*UDi*) por tratamiento.

Figure 8. Degree of dominance in diameters (*UDi*) by treatment.

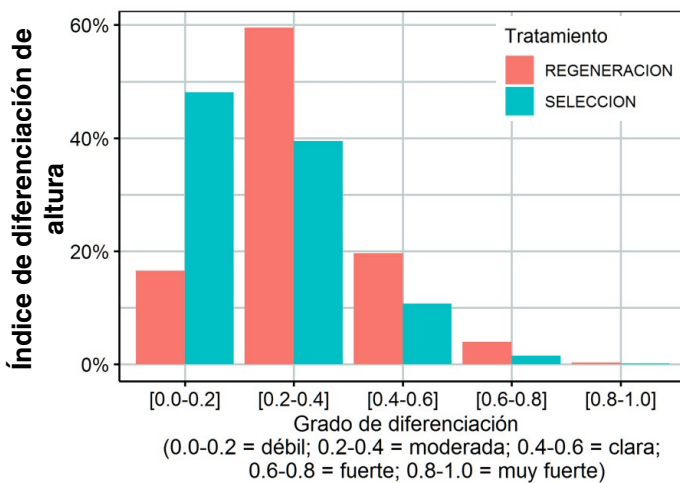


Figura 7. Grado de diferenciación de alturas (*THi*) por tratamiento.

Figure 7. Degree of height differentiation (*THi*) by treatment.

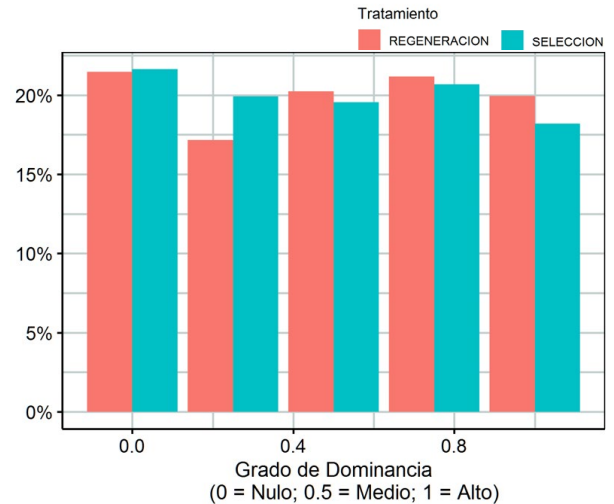


Figura 9. Grado de dominancia en alturas (*UHi*) por tratamiento.

Figure 9. Degree of dominance in heights (*UHi*) by treatment.

especies similares, mientras que más del 65 % están rodeados por una o cuatro especies diferentes al árbol central. Por otro lado, para el tratamiento de selección, más del 50 % se encuentra en la categoría 0, indicando una mezcla nula de especies en más de la mitad de los grupos estructurales en estos rodales (figura 5).

El valor promedio del índice de diferenciación por diámetros (*TDi*) para el tratamiento de regeneración fue de 0,38, con un intervalo del 95 % de confianza [0,369, 0,407], mientras que para el tratamiento de selección fue de 0,32 [0,251, 0,401]. Estas diferencias no resultaron estadísticamente significativas. En las distribuciones

de frecuencias para ambos tratamientos la categoría de *TDi* más representada fue la moderada. Para el tratamiento de regeneración, la segunda categoría *TDi* más representada fue la clara, mientras que para el tratamiento de selección, la segunda categoría fue la débil (figura 6).

El valor promedio del índice de diferenciación de alturas (*THi*) para el tratamiento de regeneración fue de 0,33, con un intervalo del 95 % confianza [0,305, 0,346], mientras que para el tratamiento de selección fue de 0,25 [0,191, 0,378]. Estas diferencias tampoco resultaron estadísticamente significativas. En el tratamiento de

regeneración la *THi* más representada fue moderada, seguida de clara. Mientras que en el tratamiento de selección la *THi* débil fue la más representada seguida de la moderada, lo cual indica que existe tendencia a mayor diferenciación en el tratamiento de regeneración (figura 7).

El valor promedio del índice de dominancia dimensional por diámetros (*UDi*) para el tratamiento de regeneración fue de 0,52, con un intervalo del 95 % de confianza [0,508, 0,527], mientras que para el tratamiento de selección fue de 0,49 [0,481, 0,497]. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas con un valor de $p < 0,001$, una diferencia de 0,026 [0,0149, 0,0379]. En cuanto a la distribución por frecuencias, en los dos tratamientos existen todas las clases diamétricas representadas de manera no muy diferenciada. En el tratamiento de regeneración se presentó mayor número de individuos en las clases de dominancia alta, mientras que en el de selección el mayor número de individuos se presentó en la clase 0,25 (figura 8).

El valor promedio del índice de dominancia de alturas (*UHi*) para el tratamiento de regeneración fue de 0,50, con un intervalo del 95 % confianza [0,49, 0,524], mientras que para el tratamiento de selección fue de 0,49 [0,475, 0,517]. Los valores de *UHi* no indicaron diferencias significativas en las comparaciones entre tratamientos. En ambos tratamientos existen todas las categorías de *UHi* distribuidas entre el 15 y el 25 %. Sin embargo, tanto para el de regeneración como para el de selección se presentó un mayor número de grupos estructurales en las clases de dominancia nula (figura 9), es decir, que sus árboles vecinos son más altos.

Discusión

La densidad y el área basal en cada tratamiento fue diferente, *P. durangensis* presenta los mayores valores en el de regeneración, mientras que el de selección ocupa el segundo lugar; esta especie, es considerada como una de las más abundantes y con mayor área basal en los bosques de la SMO, con valores superiores a 100 árboles ha^{-1} y 10 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ de área basal [25], además, es considerada como una de las especies del género *Pinus* más importantes en México, por su área de distribución, calidad de madera y valor comercial [26].

Los tratamientos silvícolas provocan cambios en la estructura forestal del bosque y promueven el establecimiento de la regeneración [27]. En ambos tratamientos se presenta una distribución diamétrica de tipo J invertida, aunque el tratamiento de selección tiene la mayor densidad en las categorías diamétricas menores. La distribución de tipo J invertida, es una

condición que comúnmente se presenta en bosques que han sido perturbados (en este caso intervenidos) y es la mejor garantía de la supervivencia de la comunidad forestal, ya que los individuos de dimensiones mayores son eliminados ocasionalmente y sustituidos sin dificultad por individuos de las categorías diamétricas inferiores [28], garantizando la continuidad del bosque. Esto es muy similar a lo registrado por [29], quienes encontraron mayor cantidad de individuos en las categorías diamétricas menores y disminución del número de árboles conforme aumenta la categoría diamétrica en un bosque templado de Puebla, México.

Si bien, la distribución de árboles (*Wi*) en cada tratamiento es cercana a aleatoriedad, algunos autores sugieren que valores menores a 0,475 indican una distribución regular y aquellos mayores a 0,517 distribución irregular [30]. De acuerdo con lo anterior, para el tratamiento de regeneración corresponde una distribución tendiente al agrupamiento, es decir, a crear aglomeraciones con arbolado residual, mientras el tratamiento de selección genera una distribución más regular, parecido a una plantación en el que los árboles se distribuyen de manera uniforme. Lo cual podría indicar que los tratamientos aplicados tienen una influencia en la distribución espacial de los rodales, ya que intervenciones silvícolas fuertes tienden a modificar la dicha estructura en el arbolado residual [3]. Otros estudios han reportado valores más altos, como el de [31], quienes registraron el valor de $Wi = 0,57$ para dos parcelas con aclareos y con tratamiento de selección en bosques de Durango, México. En otra investigación [19], registraron un valor promedio de $Wi = 0,49$ en un bosque de *Pinus - Quercus* regenerado posincendio en Nuevo León, México. En algunos casos, durante el proceso de sucesión, la comunidad forestal suele cambiar gradualmente de agrupada a regular y el proceso está acompañado de un debilitamiento aleatorio de las asociaciones interespecíficas entre las especies dominantes [32].

Respecto al índice de mezcla de especies (*Mi*), en ambos tratamientos, los valores son bajos, sugiriendo una baja mezcla e incluso se presentan manchones con nula mezcla ($Mi = 0$), sin embargo, esto es más notorio en el tratamiento de selección. Los resultados de este estudio concuerdan con los valores reportados por [31], quienes estimaron el índice *Mi* entre 0,30 y 0,44 en rodales con aclareos y con tratamiento de selección respectivamente. Por otro lado, en áreas naturales protegidas se han registrado valores muy superiores a los reportados en este estudio con un índice *Mi* de 0,61 [34]. Esto se puede atribuir a que generalmente los tratamientos silvícolas favorecen a las especies comerciales importantes, lo que hace que la mezcla de especies sea menor en algunos sitios con aprovechamiento forestal [34].

En los dos tratamientos se registró una diferenciación diamétrica (*TDi*) moderada, es decir, que la mayoría de los árboles presentan tendencia a la similitud en diámetros, sin embargo, esto es más visible en el de selección. Generalmente la diferenciación de diámetro moderada es causada por los tratamientos silvícolas aplicados en áreas con aprovechamientos forestales que intentan dejar árboles con diámetros similares para futuras intervenciones [35]. Los valores de *TDi* (cerca de 0,75) reportados por [33] fueron superiores a los encontrados en este estudio, observando la existencia de complejas estructuras forestales residuales en áreas naturales protegidas. Respecto a la diferenciación en altura (*THi*), los resultados son similares a los anteriores (*TDi*); tendencia a la similitud, en este caso altura. Pero en el de selección existe la mayor proporción de individuos que presentan alturas iguales. Según [36], mediante la aplicación de tratamientos de silvicultura, la altura es una variable que se ve menos afectada que el diámetro, por lo que generalmente se encuentra mayor diferenciación en diámetro que en altura.

La dominancia dimensional en diámetro (*UDi*) y en altura (*UHi*), indican que, en los dos tratamientos, todas las clases sociales de árboles se encuentran representadas de forma similar, las cuales pueden ser, suprimidos, intermedios, codominantes y dominantes, pero con mayor tendencia a la dominancia en diámetro en el tratamiento de regeneración, mientras que ambos tratamientos existen una leve tendencia a una dominancia nula en alturas, es decir, mayor proporción de árboles suprimidos. Se han registrado comportamientos similares en bosques evaluados después de incendios [19] y en áreas de matorral espinoso tamaulipeco con diferentes tipos de perturbación [35]. Esto podría ser un efecto de los tratamientos aplicados donde se diferencian dos estratos, el de los árboles dominantes y el de los suprimidos [37]. Valores similares han sido registrados en áreas bajo manejo forestal en la SMO, donde los bosques presentan diferenciación por dimensiones heterogéneas [31].

Conclusiones

Los índices empleados en este estudio permitieron caracterizar la estructura espacial y la composición de especies arbóreas en áreas sujetas a diferentes tratamientos silvícolas. Los resultados mostraron diferencias significativas en la distribución espacial de los rodales, evidenciando que las cortas de selección favorecen la formación de rodales más uniformes y con menor heterogeneidad en la composición, mientras que el tratamiento de árboles padre tiende a generar rodales más irregulares y diversificados. Estas diferencias, junto con las distribuciones diamétricas en forma de J invertida observadas, coinciden con

estudios previos sobre los efectos del manejo forestal y las perturbaciones naturales, como incendios, en la estructura de los rodales.

No obstante, futuros estudios deberían enfocarse en evaluar de manera más detallada los efectos de las perturbaciones naturales sobre la distribución espacial del arbolado residual, especialmente a lo largo del tiempo. Para ello, sería fundamental establecer sitios de monitoreo permanentes con dimensiones adecuadas que permitan realizar análisis longitudinales más robustos.

Los hallazgos de este trabajo tienen importantes implicaciones para el manejo forestal, proporcionando información valiosa para el desarrollo de metodologías que consideren y se alineen con la dinámica natural de los ecosistemas forestales de la región. Esto podría contribuir a una gestión más sostenible y efectiva, que integre las necesidades productivas con la conservación de la biodiversidad y la resiliencia de los bosques.

Referencias

- [1] V. S. Galván-Moreno, et al., "Efecto del manejo forestal en los ecosistemas forestales", e-CUCBA, vol. 22, no. 11 pp. 27-33, 2024.
- [2] J. Oettel, & K. Lapin, "Linking forest management and biodiversity indicators to strengthen sustainable forest management in Europe". Ecological Indicators, vol. 122, pp. 107275, 2021.
- [3] J. J. Corral, et al., "Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el bosque mesófilo de montaña a El Cielo, Tamaulipas, México". Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, vol. 14, no. 2, pp. 217-228, 2005.
- [4] Y. Y. Guevara-Fisher, et al., "Efecto de la corta de matorrasa en la diversidad de la regeneración arbórea en Durango, México". Revista Mexicana de Ciencias Forestales, vol. 12, no. 63, pp. 28-47, 2021.
- [5] E. Silva-González, et al., "Evaluación del aprovechamiento forestal en la diversidad y estructura de un bosque templado en Durango". Revista Mexicana de Ciencias Forestales, vol. 13, no. 71, pp. 103-132, 2022.
- [6] O. A. Aguirre-Calderón, "Manejo forestal en el siglo XXI". Madera y bosques, vol. 21, no. SPE, pp. 17-28, 2015.
- [7] T. J. Fahey, et al., "Forest carbon storage: Ecology, management, and policy". Frontiers in Ecology and the Environment, vol. 8, pp. 245-252, 2010.

- [8] K. V. Gadow, et al., "Forest structure and diversity", *Continuous Cover Forestry*, vol. 1, pp. 29-83, 2012.
- [9] R. Ni, Y. C. Baiketuerhan, et al., "Analysing structural diversity in two temperate forests in northeastern China". *Forest Ecology and Management*, vol. 316, pp. 139-147, 2014.
- [10] E. Silva-González, et al., "Efecto de tratamientos silvícolas en la diversidad y estructura forestal en bosques templados en Durango, México". *Madera y Bosques*, vol. 27, no. 2, pp. e2722082, 2021.
- [11] V. F. Vásquez-Cortez, et al., "Estructura, composición y diversidad arbórea y arbustiva en tres condiciones de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca". *Madera y Bosques*, vol. 24, no. 3, pp. e2431649, 2018.
- [12] T. G. Ramírez-Guaman, & D. Lozano, "Diversidad florística y estructura de la regeneración natural del bosque piemontano con intervención de manejo forestal en el sur de Ecuador". *Bosques Latitud Cero*, vol. 14, no. 1, pp. 105-122, 2024.
- [13] G. A. Chávez-Flores, et al., "Estructura espacial de los bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango". *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, vol. 11, no. 59, pp. 141-162, 2020.
- [14] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Cartas temáticas del estado de Durango*. Aguascalientes, México: INEGI, 2009.
- [15] J. J. Corral-Rivas, et al., *Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango*. Durango, México: Editorial UJED, 2009.
- [16] P. Beckschäfer, et al., "Enhanced Structural Complexity Index: An Improved Index for Describing Forest Structural Complexity", *Open Journal of Forestry*, vol. 3, no. 1, pp. 23-29, 2013.
- [17] R Development Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.
- [18] K. V. Gadow, O. S. et al., *Estructura y crecimiento del bosque*. Göttingen, Alemania: Universidad de Göttingen, 2007.
- [19] E. A. Rubio-Camacho, et al., "Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México", *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 88, no. 1, pp. 113-121, 2017.
- [20] K. Fülde, "Zur Strukturbeschreibung in Mischbeständen", *Forstarchiv*, vol. 66, Jan., pp. 149-161, 1995.
- [21] A. Pommerening, "CRANCOD: A Program for the Analysis and Reconstruction of Spatial Forest Structure", 2012. [Online]. Available: <http://www.crancod.org>. [Accessed: Nov. 25, 2023].
- [22] O. A. Aguirre, et al., "Strukturuntersuchungen in einem Kiefern-Durchforstungsversuch Nordmexikos" *Allgemeine Forst u. Jagdzeitung*, vol. 169, Dec., pp. 213-220, 1998.
- [23] A. Pommerening, & D. Stoyan, "Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure", *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1723-1739, 2006.
- [24] P. Mair, et al., "WRUMP DOS: a collection of robust statistical methods", 2015. [Online]. Available: https://cran.rproject.org/web/packages/WRUMP_DOS/index.html. [Accessed: Nov. 15, 2023].
- [25] G. Graciano-Ávila, O. A. Aguirre-Calderón, E. Alanís-Rodríguez, & J. E. Luján-Soto, "Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México". *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 4, no. 12, pp. 535-542, 2017.
- [26] L. Gómez-Mendoza, & L. Arriaga, "Modeling the Effect of Climate Change on the Distribution of Oak and Pine Species of Mexico", *Conservation Biology*, vol. 21, no. 6, pp. 1545-1555, 2007.
- [27] R. Ramírez-Santiago, et al., "Efectos del aprovechamiento forestal en la estructura, diversidad y dinámica de rodales mixtos en la Sierra Juárez de Oaxaca, México", *Madera y Bosques*, vol. 25, pp. 1-12, 2019.
- [28] H. Lamprecht, *Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*. Eschborn, Alemania: GTZ (GMBH), 1990.
- [29] J. A. López-Hernández, et al., "Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México", *Madera y Bosques*, vol. 23, no. 1, pp. 39-51, 2017.
- [30] G. Y. Hui, & K. V. Gadow, "Das Winkelmaß - Herleitung des optimalen StandardWinkels", *Allgemeine Forst u. Jagdzeitung*, vol. 173, pp. 171-176, 2002.
- [31] R. Solís-Moreno, et al., "Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México", *Madera y Bosques*, vol. 12, no. 2, pp. 49-64, 2006.
- [32] J. Zhang, et al., "Research on changes of dominant tree population distribution patterns

during developmental processes of a climax forest community”, *Acta Phytoecol*, vol. 23, pp. 256-268, 1999.

- [33] J. J. Corral-Rivas, et al., “Esquema de monitoreo de la deforestación y la biodiversidad de los bosques mixtos e irregulares del estado de Durango”, in *Presente y Futuro de los Bosques*, B. Vargas-Larreta, Ed. Durango, México: Sierke Verlag, 2013, pp. 73-98.
- [34] J. Blaser, & C. Sabogal, *Revised ITTO guidelines for the sustainable management of natural tropical forests*. Yokohama, Japan: International Tropical Timber Organization, 2011.
- [35] J. Jiménez-Pérez, et al., “Análisis sobre el efecto del uso del suelo en la diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco”, *Madera y bosques*, vol. 15, no. 3, pp. 5-20, 2009
- [36] C. J. Cano, *El sistema de manejo regular en los bosques de México: Fundamento de silvicultura y su aplicación práctica*, Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo, 1988.
- [37] E. Y. Chávez-Pascual, et al., “Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas”, *Madera y Bosques*, vol. 23, no. 3, pp. 147-161, 2017.