

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y CONTENIDO DE CARBONO EN UN  
BOSQUE DE ALTO VALOR DE CONSERVACIÓN AL NOROESTE DE  
MÉXICO**

**POR:**

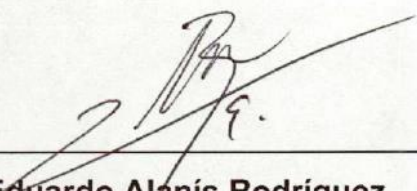
**SAMUEL ALBERTO GARCÍA GARCÍA**

Como requisito parcial para obtener el grado de  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

JULIO, 2020

**CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y CONTENIDO DE CARBONO EN UN  
BOSQUE DE ALTO VALOR DE CONSERVACIÓN AL NOROESTE DE MÉXICO**

Aprobación de Tesis



---

**Dr. Eduardo Alanís Rodríguez**

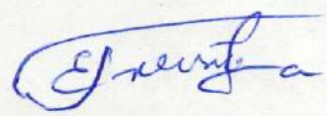
Director



---

**Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón**

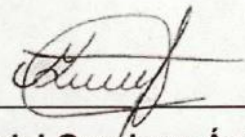
Codirector



---

**Dr. Eduardo Javier Treviño Garza**

Asesor



---

**Dr. Gabriel Graciano Ávila**

Asesor externo

JULIO, 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

La culminación de una meta siempre es importante, realizar una tesis de maestría y adentrarte en la investigación es un gran reto. Por ello, esta experiencia ha sido para mi muy enriquecedora personal y por supuesto profesionalmente.

El culminar esta etapa me deja nuevas habilidades y conocimientos para forjarme en un futuro como investigador forestal, también me deja claro que todo lo que me proponga lo puedo alcanzar, solo es cuestión de ser perseverante y trabajar en lo que desee. Esta tesis es el resultado de la colaboración de algunas instancias y personas.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la Beca Nacional otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por la oportunidad brindada para cursar esta maestría, también a todos los profesores, excelentes profesionales que formaron parte de esta etapa compartiendo sus conocimientos y experiencias.

Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez por aceptar guiarme en la realización del presente trabajo de tesis, por su apoyo incondicional y profesional, por su tiempo para hacer las observaciones necesarias. Por otro lado, agradezco sus consejos y aliento para seguir trabajando y creciendo en el ámbito de la investigación forestal.

Al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón por ser parte del comité de tesis, por su disposición, apoyo y observaciones durante todo el proceso para la realización de este trabajo, así como por los conocimientos ofrecidos en sus materias, es muy gratificante formarse con profesores como usted.

Al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza por ser parte del comité de tesis, por su tiempo, disposición y apoyo durante todo el proceso para la realización de este trabajo, de igual manera por los conocimientos transmitidos en sus materias, ha sido muy enriquecedor aprender de usted.

A mi asesor externo el Dr. Gabriel Graciano Ávila por ser parte del comité de tesis, por su tiempo y dedicación para realizar sugerencias y comentarios durante el proceso de desarrollo de cada uno de los capítulos de la presente tesis.

Al Dr. Ernesto Rubio Camacho por su gran apoyo, paciencia y dedicación en la elaboración del tercer capítulo de esta tesis, sus aportaciones han sido muy valiosas.

Al M.C Raúl Narvárez Flores por su apoyo para la identificación de algunas especies presentes en el área de estudio.

A mi padre Samuel García, mi tío Gerónimo García y mi primo Emmanuel García por el apoyo brindado en la recolección de datos en campo.

Al M.C Héctor Eligio Alanís Morales, al M.C Raúl Narvárez Flores, al Dr. Luis Ubaldo Castruita Esparza y a mi tío Jesús Manuel García Durán por el apoyo ofrecido al inicio de esta etapa.

A mi familia y amigos en general que de alguna u otra manera me hicieron sentir su apoyo en todo este proceso de formación profesional, les doy mi más sincero agradecimiento.

## **DEDICATORIA**

A mis Padres

Los logros alcanzados reflejan el apoyo, la dedicación, el tiempo y amor que invierten los padres en sus hijos. Gracias a mis padres soy quien soy, de todo corazón les dedico este trabajo a ellos; Alma Bricia García Durán y Luciano Samuel García Urbina, mi mayor ejemplo de dedicación y perseverancia para salir adelante.

A mis hermanos

Froylan Gerardo García García y Mariano Imanol García García por su apoyo incondicional durante todo este tiempo, sé que cuento con ustedes para todo y sepan que ustedes conmigo.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	7
<b>HIPÓTESIS</b> .....	8
<b>OBJETIVOS</b> .....	8
General .....	8
Particulares .....	8
<b>CAPÍTULO I</b> .....	9
<b>REGENERACIÓN Y ESTRUCTURA VERTICAL DE UN BOSQUE DE <i>PSEUDOTSUGA MENZIESII</i> (MIRB.) FRANCO EN CHIHUAHUA, MÉXICO ...</b>	9
Resumen.....	10
Abstract.....	10
Introducción .....	11
Material y Métodos .....	13
Área de estudio .....	13
Evaluación en campo .....	14
Análisis de la información.....	14
Resultados y discusión.....	16
Composición .....	16
Distribución vertical .....	16
Abundancia .....	17
Variables de regeneración y arbolado .....	17
Diversidad y riqueza de especies .....	18
<b>CAPÍTULO II</b> .....	21
<b>CONTENIDO DE CARBONO Y ESTRUCTURA HORIZONTAL DE UN BOSQUE TEMPLADO EN GUADALUPE Y CALVO, CHIHUAHUA</b> .....	21
Resumen.....	22
Abstract.....	22
Introducción .....	23
Materiales y métodos .....	24
Evaluación en campo .....	24
Riqueza, diversidad y estructura horizontal .....	25

Estimación de volumen, biomasa y contenido carbono .....	26
Resultados y discusión.....	28
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>33</b>
<b>PATRONES DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ARBOLADO EN UN BOSQUE DE <i>PSEUDOTSUGA MENZIESII</i> EN CHIHUAHUA, MÉXICO .....</b>	<b>33</b>
Resumen.....	34
Abstract.....	34
Introducción .....	35
Materiales y métodos .....	35
Área de estudio .....	37
Toma de datos .....	38
Análisis de la información.....	39
Resultados .....	41
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo I

Tabla 1. Índice A de Pretzsch. ....	14
Tabla 2. Índices de riqueza y diversidad. ....	15
Tabla 3. Resultados de abundancia ( $N\ ha^{-1}$ ), cobertura ( $m^2\ ha^{-1}$ ) y altura (m) de las especies en los diferentes estratos considerados para el índice de Pretzsch ( $A$ ) e índice de Shannon ( $H'$ ) e índice de diversidad verdadera ( $D$ ) de los estratos en la comunidad vegetal regenerada. ....	20
Tabla 4. Resultados de abundancia ( $N\ ha^{-1}$ ), diámetro normal (cm) y altura (m) de las especies en los diferentes estratos considerados para el índice de Pretzsch ( $A$ ) e índice de Shannon ( $H'$ ) e índice de diversidad verdadera ( $D$ ) de los estratos en la comunidad vegetal madura. ....	20

### Capítulo II

Tabla 1. Índice de Valor de Importancia (IVI), cociente de mezcla (CM), e índice de riqueza ( $D_{Mg}$ ) y diversidad ( $H'$ ). ....	26
Tabla 2. Parámetros del modelo para la estimación de volumen de las especies evaluadas. ....	27
Tabla 3. Densidad de la madera de las especies evaluadas para el predio "El Triste" del ejido Chinatu en Guadalupe y Calvo, Chihuahua. ....	27
Tabla 4. Valores de densidad, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia. ....	30
Tabla 5. Valores de volumen, biomasa y contenido de carbono. ....	32

### Capítulo III

Tabla 1. Características dasométricas del área de estudio. ....	41
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo I

Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo ..... 13

### Capítulo II

Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo..... 25

Figura 2. Densidad de especies arbóreas por clase diamétrica..... 29

### Capítulo III

Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo..... 38

Figura 2. Distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios por género..... 43

Figura 3. Distribución del índice de uniformidad de ángulos ( $W_i$ ) general y por género: *Pseudotsuga*, *Quercus* y *Pinus*. El grupo general incluye a todos los géneros..... 44

Figura 4. Distribución del índice de mezcla de especies ( $M_i$ ) general y por género..... 45

Figura 5. Distribución del índice de dominancia dimensional diamétrica ( $UD_i$ ) general y por género..... 46

Figura 6. Distribución del índice de dominancia dimensional de altura ( $UH_i$ ) general y por género..... 47

Figura 7. Distribución del índice de diferenciación dimensional diamétrica ( $TD_i$ ) general y por género..... 48

Figura 8. Distribución del índice de diferenciación dimensional de altura ( $TH_i$ ) general y por género..... 49

## RESUMEN

En nuestro país los bosques templados cubren alrededor del 20% del territorio nacional, concerniendo el 14% a bosques de pino y pino-encino, 5 % a bosques de encino y 1% a otras. Los bosques de *Pseudotsuga* no rebasan las 25,000 ha de superficie; ubicándose en la Sierra Madre Occidental, Oriental y en el centro – sur del país, se sabe que sus poblaciones son pequeñas y fragmentadas. En México y el mundo se han llevado a cabo estudios enfocados a evaluar la estructura y distribución espacial de comunidades forestales, tratando de responder a distintas preguntas de investigación. El objetivo de la tesis fue caracterizar la estructura vertical y horizontal, determinar la riqueza, diversidad y contenido de carbono, así como describir los patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque de alto valor de conservación al noroeste de México. Para evaluar la comunidad vegetal se establecieron ocho sitios circulares de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>, los cuales fueron distribuidos aleatoriamente en el área de estudio (80.46 ha). En los sitios de muestreo se consideraron los individuos con diámetro normal ( $d_{1.30}$ )  $\geq 7.5$  cm para el arbolado adulto y los menores de 7.5 cm pero mayores a 0.25 m de altura total para la regeneración. A cada individuo se le registró la altura total ( $h$ ), el diámetro normal ( $DAP$ ), diámetro de copa (en sentido norte–sur y este–oeste) y se registró la especie a la que pertenecía cada individuo. El bosque estudiado cuenta con una riqueza y diversidad de especies baja. Se registraron ocho especies para la comunidad vegetal regenerada, con una densidad de 248 N/ha<sup>-1</sup>, las familias con mayor presencia fueron Pinaceae con cinco especies y Fagaceae con dos; la comunidad vegetal madura registró 10 especies, con 460 N/ha<sup>-1</sup>, las más predominantes fueron Pinaceae con seis taxones y Fagaceae con dos. Las alturas máximas del bosque fueron 8.0 m y 29.0 m para regeneración y arbolado maduro, respectivamente. Con el Índice  $A$  de Pretzsch se precisó que el mayor número de individuos se reúne en el estrato III (Bajo) para ambos tipos de árboles. Las especies con mayor regeneración son *Abies durangensis*, *Juniperus deppeana*, *Quercus tuberculata* y *Pseudotsuga menziesii*, la última de las cuales es dominante en el estrato arbóreo. La especie

de mayor valor ecológico (IVI) fue *Pseudotsuga menziesii* con 26.14%; la distribución diamétrica se encuentra en forma de curva de Liocourt y balanceada y el contenido de carbono almacenado fue de 45.20 Mg C ha<sup>-1</sup>. Al evaluarse los patrones de distribución espacial se reflejó una distribución aleatoria de acuerdo con el índice ( $Wi$ ), mientras que el grado de mezcla ( $Mi$ ) manifestó que la especie referencia cuenta con más de 2 vecinos de diferente especie, no se registró una dominancia clara de diámetros y alturas de manera general ya que ( $UDI$ ) y ( $UHi$ ) mostraron valores similares en cada uno de los grados de dominancia, la diferenciación dimensional ( $TDi$ ) y ( $THi$ ) fue moderada, dando a notar que existe poca variación en las dimensiones del arbolado, similar a estudios en bosques perturbados y bajo manejo.

## ABSTRACT

In our country, temperate forests cover around 20% of the national territory, Concerning 14% of pine and pine-oak forests, 5% of oak forests and 1% of others. The forests of *Pseudotsuga* do not exceed 25,000 ha in area; Located in the Sierra Madre Occidental, Oriental and in the center - south of the country, it is known that their populations are small and fragmented. Studies focused on evaluating the spatial distribution and structure of forest communities have been carried out in Mexico and the world, trying to answer different research questions. The objective of the thesis was to characterize the vertical and horizontal structure, determine the richness, diversity and carbon stock, as well as describe the spatial distribution patterns of trees in a forest of high conservation value in the northwest of Mexico. To assess the plant community, eight circular sampling sites of 1000 m<sup>2</sup> were established, which were randomly distributed in the study area (80.46 ha). At the sampling sites, individuals with a normal diameter ( $d_{1.30}$ )  $\geq 7.5$  cm were considered for adult trees and those less than 7.5 cm but greater than 0.25 m in total height for regeneration. The total height (h), the normal diameter (DAP), crown diameter (in the north – south and east – west sense) were recorded for each individual and the species to which each individual belonged was recorded. The studied forest has a low richness and diversity of species. Eight species were registered for the regenerated plant community, with a density of 248 N/ha<sup>-1</sup>, the families with the greatest presence were Pinaceae with five species and Fagaceae with two; the mature plant community recorded 10 species, with 460 N/ha<sup>-1</sup>, the most predominant being Pinaceae with six species and Fagaceae with two. The maximum heights of the forest were 8.0 m and 29.0 m for regeneration and mature woodland, respectively. With the Pretzsch Index A it was determined that the largest number of individuals belongs to stratum III (Low) for both types of trees. The species with the highest regeneration are *Abies durangensis*, *Juniperus deppeana*, *Quercus tuberculata* and *Pseudotsuga menziesii*, the latter of which is dominant in the tree stratum. the species with the highest ecological value (IVI) was *Pseudotsuga menziesii* with 26.14%; the diametric distribution is in the form of a Liocourt curve and balanced and the

stored carbon content was 45.20 Mg C ha<sup>-1</sup>. When evaluating spatial distribution patterns, a random distribution was reflected a random distribution according to index (*Wi*), while the degree of mixing (*Mi*) stated that the reference species has more than 2 neighbors of different species, no dominant diameters and heights were generally recorded as (*UDi*) and (*UHi*) showed similar values in each of the degrees of dominance, the dimensional differentiation (*TDi*), (*THi*) it was moderate, similar to studies in disturbed and under-managed forests.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques cubren aproximadamente el 30% de la superficie terrestre y brindan una serie de servicios ecosistémicos como la regulación del clima, captura de carbono y contribuyen a la recarga de mantos acuíferos, entre otros (Bonan, 2008; Solís, 2018).

En nuestro país los bosques templados cubren alrededor del 20% del territorio nacional; concerniendo el 14% a bosques de pino y pino-encino, 5 % a bosques de encino y 1% a otras (Challenger, 1998; Rzedowski, 1991). Las poblaciones de *Pseudotsuga* no rebasan las 25,000 ha de superficie (Rzedowski, 1978); ubicándose en la Sierra Madre Occidental, Oriental y en el centro – sur del país (Castruita-Esparza et al., 2016; García et al., 2019; Ortega, 2017); sus poblaciones son pequeñas, fragmentadas (Vargas-Hernández, 2004); además estas poblaciones presentan alteraciones relacionadas con el cambio de uso de suelo, el sobrepastoreo o la tala clandestina (Mápula et al., 2007; Velasco et al., 2007).

La estructura de una masa forestal está relacionada con el hábitat y el nicho ecológico de muchas especies de plantas y animales, y puede llegar a utilizarse como un indicador de la biodiversidad (Murdoch et al., 1972; Degraaf et al., 1998). La estructura del bosque puede ser caracterizada a nivel de diversidad de especies, dimensiones y a nivel espacial (Gadow, 2007; Kulik et al., 2019; Lin et al., 2020; Mena-Mosquera et al., 2020; Pommerening et al., 2020); está influye en las tasas y magnitudes de la acumulación de carbono en la biomasa viva y muerta, lo cual es relevante para la función de regulación climática de los ecosistemas de bosques templados (Hardiman et al., 2011; Urbano y Keeton, 2017).

La presente tesis se llevó a cabo en la Sierra Madre Occidental (SMO) en un bosque templado donde la especie de mayor peso ecológico es *Pseudotsuga menziesii* la cual se encuentra bajo protección especial (PR) y coexiste junto a *Picea Chihuahuana* la cual se encuentra en peligro de extinción (P) (SEMARNAT, 2002) especie endémica de nuestro país y en categoría de menor preocupación

(LC) para la UICN (Farjon, 2013). Dicha área se encuentra catalogada como “Relicto de bosque viejo o sobremaduro” de acuerdo con (Galván-Moreno, 2016) y se encuentra excluida del aprovechamiento forestal en el programa de manejo.

De acuerdo con esto el área de estudio presenta una oportunidad para ser Área Natural Protegida como Área Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) ya que cuenta con algunas de las características requeridas para obtener dicho certificado (DOF, 1998; LGEEPA, 2000).

Con la finalidad de conocer y describir de mejor manera el estado actual de este ecosistema en la presente tesis se abordaron tres capítulos:

Capítulo I: Caracterización de la estructura vertical. Se analizó la estructura vertical de la regeneración y del arbolado mediante el Índice  $A$  de Pretzsch, se estimó la abundancia ( $N\ ha^{-1}$ ), los valores medios, mínimos, máximos y coeficiente de variación de la altura y diámetro normal y cobertura, así como la diversidad con base en el Índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ) y el Índice de Margalef ( $D_{Mg}$ ).

Capítulo II: Caracterización de la estructura horizontal y estimación de la cantidad de carbono. Se analizó la estructura horizontal de acuerdo con el índice de valor de importancia (IVI) y clases diamétricas, además se determinó el cociente de mezcla, la riqueza y diversidad de especies de acuerdo con el índice de Margalef ( $D_{Mg}$ ) e índice de Shannon-Weaver ( $H'$ ).

Capítulo III: Caracterización de los patrones de distribución espacial. Se utilizó un análisis de patrón de puntos para evaluar la distribución ( $Wi$ ), mezcla ( $Mi$ ), diferenciación dimensional ( $TDi$  y  $THi$ ) y dominancia dimensional ( $UDi$  y  $UHi$ ), esto para el bosque en general y para los géneros de mayor más abundantes, de mayores dimensiones y más investigados en este aspecto (*Pseudotsuga*, *Quercus* y *Pinus*).

## JUSTIFICACIÓN

La conservación de los bosques es importante para la subsistencia de muchas especies, así como para la vida humana ya que estos brindan una gran variedad de productos y servicios ambientales como: provisión de madera, plantas medicinales, recursos genéticos, la recarga de los mantos acuíferos, disminución de la erosión, calidad del aire y estabilidad del suelo, además mediante el proceso de fotosíntesis los árboles, capturan dióxido de carbono y generan oxígeno.

Actualmente los bosques en nuestro país están sometidos a diversas problemáticas que amenazan su permanencia como lo es el cambio climático, la tala ilegal, el pastoreo, la agricultura, el crecimiento de densidad poblacional, las sequías e incendios forestales. Estos disturbios generan cambios en la estructura, composición y equilibrio de los ecosistemas.

El conocimiento de la estructura, riqueza, diversidad, contenido de carbono y de los patrones de distribución espacial a nivel especie o género brinda información básica del estado actual de los bosques. Lo anterior puede ser base para generar programas de manejo específicos para la conservación de bosques vulnerables a los cambios, así como da pie a la generación de conocimiento en el desarrollo de futuros planes de investigación.

De acuerdo con lo anterior en esta investigación se realizó la caracterización estructural, se determinó el contenido de carbono y se describieron los patrones de distribución espacial en un área de bosque templado con especies de interés para la conservación, ofreciendo así, información importante para el manejo de esta área no evaluada anteriormente.

## HIPÓTESIS

- La riqueza y diversidad del bosque es similar a la encontrada en diferentes estudios de bosques templados.
- La estructura vertical del bosque presenta escasa regeneración y el arbolado presenta mayor cantidad de individuos en el estrato III.
- La estructura horizontal del bosque presenta un desbalance en algunas clases diamétricas y el contenido de carbono es alto.
- La distribución, mezcla y homogeneidad dimensional a nivel espacial del arbolado es diferente a la presentada en bosques perturbados u aprovechados.

## OBJETIVOS

### General

- Caracterizar la estructura vertical y horizontal, determinar la riqueza, diversidad y contenido de carbono, así como describir los patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque de alto valor de conservación al noroeste de México.

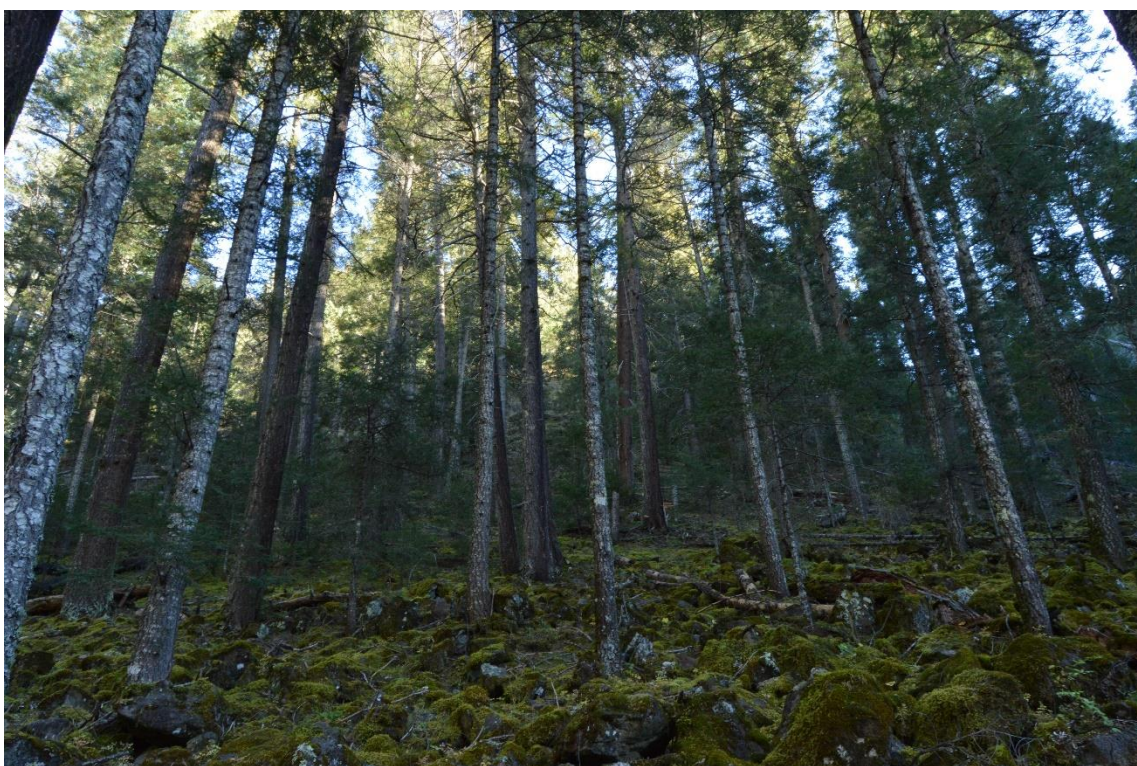
### Particulares

- Determinar el índice de diversidad de Shannon-Wiener ( $H'$ ), índice de riqueza de Margalef ( $D_{Mg}$ ) y el índice de diversidad verdadera ( $D$ ).
- Conocer la composición vegetal de la regeneración y el arbolado adulto.
- Determinar la estructura vertical de la regeneración y el arbolado mediante el índice  $A$  de Pretzsch.
- Determinar la estructura horizontal por medio del índice de valor de importancia (IVI).
- Estimar los valores de volumen, biomasa y contenido de carbono.
- Describir los patrones de distribución espacial del arbolado por medio de la distribución, mezcla y homogeneidad de los géneros.

## CAPÍTULO I

### REGENERACIÓN Y ESTRUCTURA VERTICAL DE UN BOSQUE DE *PSEUDOTSUGA MENZIESII* (MIRB.) FRANCO EN CHIHUAHUA, MÉXICO

### REGENERATION AND VERTICAL STRUCTURE OF A *PSEUDOTSUGA MENZIESII* (MIRB.) FRANCO FOREST IN CHIHUAHUA STATE, MEXICO



Fotografía del área de estudio “El Triste” en el ejido Chinatú.

Manuscrito sometido el 12 de septiembre de 2019. Aceptado el 31 de enero de 2020. Este documento se debe citar como: García García, S., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O., Treviño Garza, E., & Graciano Ávila, G. (2020). Regeneración y estructura vertical de un bosque de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Chihuahua, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 11(58). <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.665>

## Resumen

Para la caracterización de la estructura vertical de un bosque de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Chinatú, municipio de Guadalupe y Calvo, Chihuahua se realizó un muestreo aleatorio de ocho sitios circulares de 1000 m<sup>2</sup> dispersos en 80.46 hectáreas de superficie. Con la información obtenida se analizó la estructura vertical de la regeneración y el arbolado mediante el índice *A* de Pretzsch, se estimó la abundancia (N ha<sup>-1</sup>), los valores medios, mínimos, máximos y coeficiente de variación de la altura y diámetro normal o cobertura, así como la diversidad en base al índice de Shannon-Wiener (*H'*) y el índice de Margalef (*D<sub>Mg</sub>*). Se registraron ocho especies para la comunidad vegetal regenerada, las familias con mayor presencia fueron *Pinaceae* con cinco especies y *Fagaceae* con dos, la comunidad vegetal madura registró 10 especies siendo las familias *Pinaceae* con seis especies y *Fagaceae* con dos las más predominantes. Las alturas máximas del bosque fueron 8.0 m y 29.0 m para regeneración y arbolado maduro respectivamente. De acuerdo al índice *A* el mayor número de individuos se presentó en el estrato III (Bajo) para los dos casos. Las especies con mayor regeneración son *Abies durangensis*, *Juniperus deppeana*, *Quercus tuberculata* y *Pseudotsuga menziesii*; sin embargo, el estrato arbóreo es dominado por *P. menziesii*. Se concluye que el bosque estudiado cuenta con una riqueza y diversidad de especies baja, es una comunidad con presencia de especies del alto valor ecológico para conservación y cuenta con regeneración de la mayoría de las especies presentes.

**Palabras clave:** Caracterización, Diversidad, Índice de Pretzsch, Sierra Madre Occidental.

## Abstract

For the characterization of the vertical structure of a *Pseudotsuga menziesii* forest in the ejido Chinatú, municipality of Guadalupe y Calvo, Chihuahua a random sampling of eight circular sites of 1000 m<sup>2</sup> dispersed in 80.46 hectares of surface was carried out. With the information obtained, the vertical structure was analyzed

means of the Pretzsch index  $A$ , applying it to the regeneration and to the woodland, the abundance ( $N\ ha^{-1}$ ) was estimated, the mean, minimum, maximum values and coefficient of variation of the height and normal diameter or cover, as well as diversity based on the Shannon-Wiener index ( $H'$ ) and the Margalef index ( $D_{Mg}$ ). Eight species were recorded for the regenerated plant community, the families with the greatest presence were Pinaceae with five species and Fagaceae with two, the mature plant community recorded 10 species, with the Pinaceae families with six species and Fagaceae with two the most predominant. The maximum heights of the forest were 8.0 m and 29.0 m for regeneration and mature trees respectively. According to index  $A$ , the largest number of individuals was presented in stratum III (Low) for the two cases. The species with most regeneration are *Abies durangensis*, *Juniperus deppeana*, *Quercus tuberculata* and *Pseudotsuga menziesii*; however, the arboreal stratum is dominated by *P. menziesii*. It is concluded that the forest studied has a richness and diversity of low species, is a community with the presence of species of high ecological value for conservation and has regeneration of most of the species present.

**Keywords:** Characterization, Diversity, Pretzsch Index, Sierra Madre Occidental.

## Introducción

En México las coníferas muestran amplia distribución y están presentes en diversos tipos de vegetación, de acuerdo con Rzedowski (1978) se encuentran en el bosque de pino, matorral, bosque de *Abies*, bosque de *Pseudotsuga* y *Picea*, bosque o matorral de *Juniperus* y bosque de *Cupressus*. Además, habitan en otros tipos de vegetación como el bosque mesófilo de montaña, bosque mixto (por ejemplo, bosque de pino-encino), matorral xerófilo y bosque de galería. *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco es una de las coníferas más importantes del mundo por su amplia distribución, por la superficie plantada en varios países y por su valor económico (Owston y Stein, 1974; Hermann y Lavender, 1999). Fowells, (1965) indica que esta especie se distribuye desde Columbia Británica, Canadá, hasta el sur de Estados Unidos. La distribución natural de esta especie en México no es tan abundante, comprende bosques de los estados de

Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Zacatecas en la Sierra Madre Occidental, así como Nuevo León y Tamaulipas en la Sierra Madre Oriental, generalmente las poblaciones se encuentran fragmentadas, encontrándose rodales o manchones aislados, frecuentemente dominados por otras especies (Rzedowski, 1978; Domínguez, *et al.*, 2004).

La evaluación de la biodiversidad de los bosques es de gran importancia para conservar eficazmente y ordenar de forma sostenible los recursos forestales, tomando en cuenta tres aspectos principales: composición, estructura y función (Newton y Kapos, 2002; Del Río *et al.*, 2003). Para el estudio de la biodiversidad se consideran índices estructurales y variables dendrométricas que incluyen diámetro, altura, área basal, densidad, entre otras, para así lograr una mejor descripción (Aguirre *et al.*, 2003). La estructura de una masa forestal está relacionada con el hábitat y nicho ecológico de muchas especies de plantas y animales, y puede llegar a utilizarse como un indicador de la biodiversidad (Murdoch *et al.*, 1972; Degraaf *et al.*, 1998). Con el fin de garantizar un manejo sustentable de los ecosistemas es necesario realizar entre otros aspectos una caracterización de su diversidad estructural, ya que ésta permite entre otras cosas, observar tanto los procesos de sucesión natural como los provocados por actividades antropogénicas, y así definir las actividades que deben seguirse en el manejo del bosque (Jiménez *et al.*, 2001). Durante los últimos años en los bosques templados del noroeste de México se han realizado diversos estudios que evalúan la diversidad y estructura de la vegetación arbórea de interés maderable en algunas zonas específicas (Návar-Cháidez *et al.*, 2009; Aragón-Piña *et al.*, 2010; Hernández-Salas *et al.*, 2009; Graciano-Ávila *et al.*, 2017), sin embargo, estos estudios se han enfocado principalmente a evaluar la composición y estructura horizontal, por lo que es necesario realizar estudios que contemplen áreas con especies de alto interés de conservación y distribución restringida para realizar un análisis de la regeneración y la estructura vertical. De tal forma el objetivo de este estudio es analizar la riqueza y diversidad de especies presentes en la comunidad, así como determinar su estructura vertical para conocer el comportamiento de las diferentes especies arbóreas y su

regeneración en un bosque de *Pseudotsuga menziesii* en el Estado de Chihuahua al noroeste de México.

## Material y Métodos

### Área de estudio

El estudio se realizó en un bosque mixto constituido principalmente por *Pseudotsuga menziesii*, *P. arizonica* Engelm y *Quercus tuberculata* Liebm; en el paraje “El Triste”, el cual está ubicado dentro del ejido Chinatú, municipio de Guadalupe y Calvo, al suroeste del estado de Chihuahua entre las coordenadas 26°14' y los 106°38' (Figura 1). Cuenta con una superficie de 80.46 ha y altitudes entre los 2530 y 2830 msnm. Pertenece a la Región hidrológica Río Fuerte a su vez a la provincia fisiográfica “Sierra Tarahumara” y dentro de la subprovincia “Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses” (Chávez, 2009). El tipo de suelo predominante en el área es litosol y regosol una mínima parte, el clima está clasificado como templado subhúmedo, la temperatura media anual de la región es de 13.7°C con una precipitación pluvial media anual de 1,126.8 mm (Chávez, 2009).

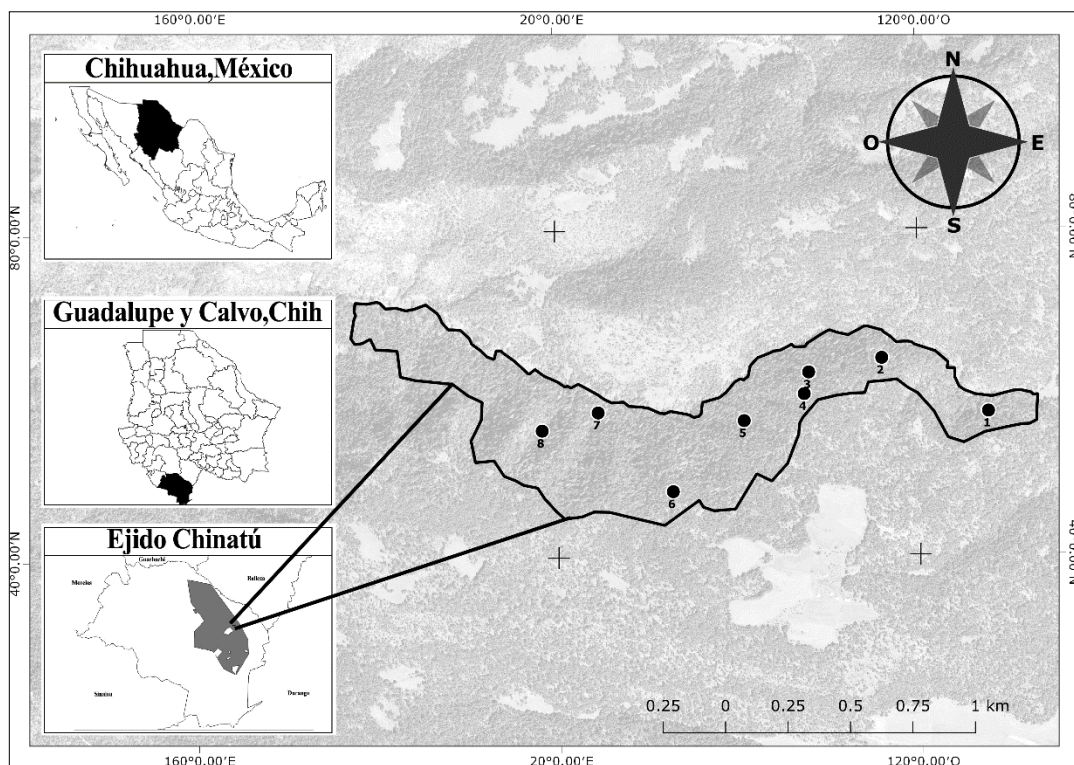


Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo.

## Evaluación en campo

Para evaluar la comunidad vegetal se establecieron ocho sitios circulares de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>, los cuales fueron distribuidos aleatoriamente en el área de estudio (80.46 ha). En los sitios de muestreo se consideraron los individuos con diámetro normal ( $d_{1.30}$ )  $\geq 7.5$  cm para el arbolado adulto y los menores de 7.5 cm pero mayores a 0.25 m de altura total para la regeneración (CONAFOR, 2012). A cada individuo se le registró la altura total ( $h$ ) con un hipsómetro *Suunto Pm-5*, el diámetro normal ( $DAP$ ) se tomó con una cinta diamétrica *Forestry Suppliers* de 5 metros, mientras que el diámetro de copa se registró con una cinta métrica de 100 m fibra de vidrio cruceta Truper® (en sentido norte-sur y este-oeste) y se registró la especie a la que pertenecía cada individuo.

## Análisis de la información

Para evaluar la estructura vertical de la comunidad vegetal se utilizó el índice de Pretzsch, el cual divide la estructura vertical en tres estratos. El estrato I (alto) que representa al intervalo de 80-100 %, donde el árbol más alto representa 100 %; a partir de éste, se clasifican los siguientes estratos: el II (medio), se refiere al intervalo de 50-80% y el III (bajo), de 0-50% (Aguirre, 2002; Pretzsch, 2009). Para una mejor interpretación del resultado se obtiene  $A_{max}$  que corresponde al valor máximo obtenido por cada una de las especies en cada estrato, el valor de  $A_{max}$  se alcanza cuando la totalidad de las especies ocurren en la misma proporción tanto en el rodal como en los diferentes estratos (Corral *et al.*, 2005) (Cuadro 1).

Tabla 1. Índice A de Pretzsch.

Índice/Ecuación	Descripción
$A = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^Z p_{ij} * \ln p_{ij}$ $A_{max} = \ln(S * Z)$ $A_{rel} = \frac{A}{\ln(S * Z)} * 100$	<p><b>Donde:</b></p> <p>S: Número de especies presentes.</p> <p>Z: Número de estratos de altura.</p> <p><math>P_{ij}</math>: Porcentaje de especies en cada zona <math>P_{ij} = n_{ij}/N</math></p> <p><math>N_{i,j}</math>: Número individuos de la misma especie (i) en la zona (j).</p> <p>N: Número total de individuos.</p>

Además, se determinó para cada uno de los estratos la abundancia de acuerdo con la cantidad de individuos ( $N \text{ ha}^{-1}$ ) presentes, el valor medio, mínimo, máximo y coeficiente de variación obtenido de las variables altura y diámetro.

La diversidad de la comunidad vegetal se evaluó utilizando el índice de Shannon-Weiner ( $H'$ ) (Shannon, 1948), índice de Margalef ( $D_{Mg}$ ) (Magurran, 2004) y la diversidad verdadera ( $D$ ) la cual permite comparar de una mejor manera la riqueza de especies (Jost, 2006) (Cuadro 2).

Tabla 2. Índices de riqueza y diversidad.

Índices		Descripción
Índice de Valor de Importancia (IVI)	$IVI = A_r + F_r + D_r$	<p><b>Donde:</b>            IVI = Índice de valor de importancia.  <math>A_r</math> = Abundancia relativa.  <math>D_r</math> = Dominancia relativa.  <math>F_r</math> = Frecuencia relativa.</p>
Cociente de mezcla (CM)	$CM = \frac{S}{N} \frac{S}{N}$	<p><b>Donde:</b>            S: Número total de especies en el muestreo.            N: Número total de individuos en el muestreo.</p>
Margalef ( $D_{Mg}$ )	$D_{Mg} = \frac{(S - 1)}{\ln(N)}$	<p><b>Donde:</b>            S= número de especies.            N=número total de individuos.</p>
Shannon-Weiner ( $H'$ )	$H' = -\sum_{i=1}^S p_i \times \ln(p_i)$ $p_i = n_i / N$	<p><b>Donde:</b>            S= número de especies.  <math>P_i</math>= proporción de individuos de la especie <math>i</math>.</p>

## Resultados y discusión

**Composición.** La comunidad vegetal regenerada (individuos con diámetro menor a 7.5 cm y mayores 0.25 m de altura total) registró ocho especies pertenecientes a seis géneros de tres familias. Las familias con mayor número de especies fueron *Pinaceae* con cinco y *Fagaceae* con dos. Para la comunidad vegetal madura (individuos con diámetros mayores a 7.5. cm) se registraron 10 especies de siete géneros en cuatro familias; las familias con más especies fueron *Pinaceae* con seis y *Fagaceae* dos. Estos resultados coinciden con diferentes estudios que señalan que dichas familias son de amplia distribución en la Sierra Madre Occidental, destacando la presencia de los géneros *Pinus* y *Quercus* (Aragón-Piña *et al.*, 2010; Hernández-Salas *et al.*, 2013; Graciano-Ávila *et al.*, 2017). La altura máxima del bosque en regeneración fue de 8.0 m y para el arbolado maduro 29.0 m, a partir de estas se delimitaron los estratos de altura en base al índice *A*.

**Distribución vertical.** Para la comunidad vegetal regenerada el resultado del índice *A* fue de 1.85, obteniendo un  $A_{max}$  de 3.18 y un  $A_{rel}$  de 58.21 %. Estos resultados indican que la distribución de especies está a un 41.79 % de la máxima posible, mientras que la comunidad vegetal madura reflejó un índice *A* de 2.58, logrando un  $A_{max}$  de 3.40 y un  $A_{rel}$  de 75.56 %, lo cual revela que el estrato arbóreo tiene una alta diversidad de especies en cuanto a altura. Estos valores son similares a los reportados por Méndez (2014) quien obtuvo un  $A= 2.07$  con un  $A_{max}= 2.70$  y por Jiménez *et al.*, (2001) quienes registraron un  $A= 2.07$  y un  $A_{max}= 3.50$ ; ambos en bosques mixtos de coníferas y latifoliadas. Este análisis de distribución vertical mostró que conforme aumenta la altura, la diversidad de especies disminuye. Jiménez *et al.* (2001) mencionan que la mayor heterogeneidad biológica se presenta conforme decrece la zona de los estratos.

La regeneración en el estrato I cuenta con el 1.01 % de los individuos, el II tiene 4.02 %, el III obtuvo 94.97 %; Según Lamprecht (1990) las especies presentes en todos los pisos o estratos se definen como especies con distribución vertical continua (DVC); *Pinus arizonica* presentó esta distribución en regeneración. El

arbolado se comportó de manera similar ya que el estrato I contó con el 2.72 % de los individuos, el II obtuvo 28.26 %, el III 69.02 % similar a lo obtenido por Jiménez *et al.*, (2001) quienes evaluaron un bosque multicohortal de *Pinus - Quercus* en el noreste de México. Las especies con distribución vertical continua en el estrato arbóreo fueron *Quercus tuberculata*, *Pseudotsuga menziesii* y *Abies durangensis*.

**Abundancia.** *Q. tuberculata* y *P. arizonica* compartieron el estrato I de la regeneración con 1 N ha<sup>-1</sup> cada una; en el estrato II *Q. tuberculata* no apareció, *P. menziesii* estuvo presente con 5 N ha<sup>-1</sup>, *P. arizonica* con 4 N ha<sup>-1</sup> y *Juniperus deppeana* 1 N ha<sup>-1</sup> y el estrato III tuvo presencia de ocho especies siendo las de mayor abundancia *A. durangensis* con 75 N ha<sup>-1</sup>, *J. deppeana* con 65 N ha<sup>-1</sup>, *Q. tuberculata* con 34 N ha<sup>-1</sup> y *P. menziesii* con 30 N ha<sup>-1</sup> (Cuadro 3). Las especies con mayor abundancia en este bosque sin perturbación pertenecieron a la familia *Pinaceae* coincidiendo con Méndez (2014), sin embargo, este fue en una evaluación post-incendio. En este tipo de bosques con disturbio se reportan hasta 812 N ha<sup>-1</sup> (Alanís *et al.*, 2011), y 3,400 N ha<sup>-1</sup> (González *et al.*, 2008) con mayor presencia de *Fagáceas*.

Se observa que todas las especies en regeneración tienen presencia en el arbolado, además aparece *Arbutus xalepensis* con 43 N ha<sup>-1</sup> en el estrato III. El bosque tiene mayor abundancia de *P. menziesii* quien en el estrato I del arbolado obtuvo 8 N ha<sup>-1</sup>, *Q. tuberculata* y *A. durangensis* 3 N ha<sup>-1</sup>; en el estrato II lo integraron nueve especies de las cuales resaltan *P. menziesii* quien tuvo 58 N ha<sup>-1</sup>, *P. arizonica* 28 N ha<sup>-1</sup> y *Q. tuberculata* con 13 N ha<sup>-1</sup> y en el estrato III se registraron 10 especies en el cual las de mayor abundancia fueron *P. menziesii* con 89 N ha<sup>-1</sup> a, *P. arizonica* 55 N ha<sup>-1</sup>, *A. xalepensis* 43 N ha<sup>-1</sup> y *Q. tuberculata* 33 N ha<sup>-1</sup> (Cuadro 4). Esto concuerda con Rubio (2014) quien reportó mayor diversidad biológica en el estrato III, de un bosque de pino – encino en Nuevo León, México.

**Variables de regeneración y arbolado.** El estrato I de la regeneración presentó un diámetro de copa promedio de 3.40 m y un promedio de altura de 7.5 m; el

estrato II obtuvo un promedio de copa de 2.27 m, mientras que de altura fue de 4.27 m y el estrato III promedió un diámetro de copa de 1.37 m con una altura promedio de 1.32 m; las especies con individuos de mayor altura fueron *P. arizonica* con 1.62 m y *Quercus sideroxyla* 1.60 m (Cuadro 3).

Mientras tanto el arbolado en el estrato I presentó diámetros medios entre 42.92 cm y 53.67 cm, con máximos de 73.0 cm en el caso de *Q. tuberculata*. La altura total presentó un promedio de 25.12 m, con un máximo de 29.0 m en el caso de *A. durangensis*; el estrato II obtuvo diámetros medios entre los 26.43 cm y 53.50 cm, llegando a alcanzar 88.5 cm para *Q. tuberculata* y de 94.0 cm en *Pseudotsuga menziesii* coincidiendo con Domínguez-Calleros (2014) donde esta especie también fue de las que registraron los mayores diámetros. Respecto a la altura el promedio fue de 16.58 m con máximas de 21.60 m para *Pinus durangensis* y en el estrato III se obtuvieron diámetros entre 12.50 cm y 18.48 cm, el promedio de altura fue de 8.59 m, *P. menziesii* presenta valores similares a los reportados por Encina-Domínguez (2008), pues *P. menziesii* junto a *Q. tuberculata*, *P. arizonica* y *A. durangensis* obtuvieron un valor máximo de de 13.50 m (Cuadro 4). Los diámetros normales en este estudio resultaron mayores a los observados por Jiménez *et al.* (2001) donde obtuvo máximos de 56.0 cm.

**Diversidad y riqueza de especies.** La diversidad de especies en la comunidad vegetal regenerada mediante el índice de Shannon ( $H'$ ) en general fue baja, el mayor valor se presentó en el estrato III con 1.63, mientras que para el estrato I y II fue de 0.05 y 0.16 respectivamente. Margalef (1972) menciona que el índice de Shannon normalmente varía de 1 a 5, interpretándose los valores menores de 2 como diversidad baja, de 2 a 3.5 diversidad media, y mayores de 3.5 como diversidad alta. Por lo que la comunidad forestal estudiada presenta una diversidad baja. El número de especies efectivas o diversidad verdadera ( $D'$ ) para el estrato I fue de 1.05, II 1.17 y III 5.10, significando que el estrato III tiene 4.3 veces más diversidad que el estrato II y 4.8 que el I (Cuadro 3).

El índice de Margalef ( $D_{Mg}$ ) de La comunidad vegetal regenerada obtuvo un valor de  $D_{Mg} = 1.52$ , similar al valor  $D_{Mg} = 1.32$  reportado por Villavicencio *et al.* (2012)

en un bosque templado de pino – encino de la Sierra de Quila, Jalisco y muy superior a lo presentado por Méndez *et al.* (2014) quienes obtuvieron un valor de  $D_{Mg} = 0.76$  en un bosque de pino - encino de la Sierra de Guerrero, México. Estos valores son bajos comparados con evaluaciones en matorral submontano donde existen valores de  $D_{Mg} = 6.34$  (Canizales-Velázquez *et al.*, 2009),  $D_{Mg} = 6.27$  (Mora *et al.*, 2013) o selva mediana subcaducifolia donde llegan a obtener valores de hasta  $D_{Mg} = 15.23$  (Gutiérrez-Báez *et al.*, 2012).

La comunidad vegetal madura al igual que la regeneración presentó una diversidad baja en base al índice de Shannon ( $H'$ ), el mayor valor se presentó en el estrato III con  $H' = 1.64$  mientras que para el estrato I y II fue de  $H' = 0.12$  y  $H' = 0.81$  respectivamente. El número de especies efectivas o diversidad verdadera ( $D'$ ) para el estrato I fue de  $D' = 1.13$ , para el II fue  $D' = 2.26$  y el III  $D' = 5.15$ , significando que el estrato III tiene 2.2 veces más diversidad que el estrato II y 4.5 que el I (Cuadro 4).

El índice de Margalef ( $D_{Mg}$ ) dio como resultado  $D_{Mg} = 1.52$  una riqueza de especies similar a la obtenida por Graciano *et al.* (2017) y González *et al.* (2018) quienes registraron  $D_{Mg} = 1.53$  y  $D_{Mg} = 1.98$  en bosques templados de los Estados de Durango y Nuevo León respectivamente, caso contrario el de Hernández-Salas *et al.*, (2013), quienes obtuvieron valores de  $D_{Mg} = 1.04$  y  $D_{Mg} = 0.90$  en bosques productivos de pino – encino del Estado de Chihuahua.

Tabla 3. Resultados de abundancia ( $N\ ha^{-1}$ ), cobertura ( $m^2\ ha^{-1}$ ) y altura (m) de las especies en los diferentes estratos considerados para el índice de Pretzsch ( $A$ ) e índice de Shannon ( $H'$ ) e índice de diversidad verdadera ( $D$ ) de los estratos en la comunidad vegetal regenerada.

Estrato	Especie	Abundancia				Cobertura				Altura				$H'$	$D$
		N/ha	Media	Mín	Máx	CV	Media	Mín	Máx	CV	Media	Mín	Máx		
I	<i>Quercus tuberculata</i>	1	3.50	3.50	3.50	0.00	7.00	7.00	7.00	0	0.05	1.05			
	<i>Pinus arizonica</i>	1	3.10	3.10	3.10	0.00	8.00	8.00	8.00	0					
	Total	2													
II	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	5	2.15	1.70	2.60	22.00	4.65	4.00	6.00	6	0.2	1.17			
	<i>Pinus arizonica</i>	4	2.17	1.80	2.50	16.00	4.06	4.00	4.10	26					
	<i>Juniperus deppeana</i>	1	2.50	2.50	2.50	0.00	4.10	4.10	4.10	0					
	Total	10													
III	<i>Abies durangensis</i>	75	1.37	0.40	3.80	80.00	1.42	0.40	2.50	79	1.6	5.10			
	<i>Juniperus deppeana</i>	65	1.24	0.30	3.90	79.00	1.39	0.50	3.50	81					
	<i>Quercus tuberculata</i>	34	1.32	0.20	3.40	84.00	1.46	0.30	3.10	87					
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	30	1.33	0.20	2.30	76.00	1.36	0.30	3.50	77					
	<i>Pinus arizonica</i>	20	1.31	0.40	2.30	58.00	1.62	0.50	2.50	69					
	<i>Pinus ayacahuite</i>	9	1.37	0.30	1.40	75.00	0.91	0.40	1.75	76					
	<i>Picea chihuahuana</i>	3	0.78	0.65	1.05	38.00	0.83	0.56	1.10	56					
	<i>Quercus sideroxyla</i>	1	1.18	1.80	1.80	0.00	1.60	1.60	1.60	0					
	Total	236													
Total general	248														

Tabla 4. Resultados de abundancia ( $N\ ha^{-1}$ ), diámetro normal (cm) y altura (m) de las especies en los diferentes estratos considerados para el índice de Pretzsch ( $A$ ) e índice de Shannon ( $H'$ ) e índice de diversidad verdadera ( $D$ ) de los estratos en la comunidad vegetal madura.

Estrato	Especie	Abundancia				Diámetro normal				Altura				$H'$	$D$
		N/ha	Media	Mín	Máx	CV	Media	Mín	Máx	CV	Media	Mín	Máx		
I	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	8	42.92	23.20	63.50	0.38	24.15	23.10	26.30	8	0.12	1.13			
	<i>Quercus tuberculata</i>	3	53.67	34.00	73.00	0.36	24.00	22.00	26.00	9					
	<i>Abies durangensis</i>	3	45.15	28.00	62.30	0.54	27.20	25.40	29.00	9					
	Total	13													
II	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	58	27.89	11.30	94.00	0.52	16.22	13.90	20.50	12	0.81	2.26			
	<i>Pinus arizonica</i>	28	29.74	14.40	53.00	0.54	16.10	13.80	20.00	12					
	<i>Quercus tuberculata</i>	13	29.80	20.50	88.50	0.54	15.55	13.80	17.80	12					
	<i>Abies durangensis</i>	16	26.80	13.00	39.50	0.45	15.95	14.00	20.10	14					
	<i>Pinus ayacahuite</i>	6	29.80	16.20	46.00	0.50	18.28	14.80	21.30	12					
	<i>Pinus durangensis</i>	4	50.83	42.50	62.00	0.20	18.57	14.80	21.60	19					
	<i>Quercus sideroxyla</i>	3	26.43	28.00	38.00	0.47	14.20	14.10	14.30	13					
	<i>Picea chihuahuana</i>	3	35.37	25.80	35.70	0.27	16.60	16.30	16.90	4					
	<i>Juniperus deppeana</i>	1	53.50	53.50	53.50	0.00	17.80	17.80	17.80	0					
Total	130														
III	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	89	16.55	7.50	42.00	0.59	9.20	4.40	13.50	34	1.64	5.15			
	<i>Pinus arizonica</i>	55	16.72	7.80	34.30	0.59	8.40	2.30	13.50	36					
	<i>Arbutus xalepensis</i>	43	18.48	7.50	82.40	0.63	7.54	3.50	12.00	37					
	<i>Quercus tuberculata</i>	33	17.16	8.00	64.00	0.61	8.29	3.10	13.50	36					
	<i>Juniperus deppeana</i>	36	17.81	8.00	31.50	0.60	5.45	2.00	12.00	37					
	<i>Pinus ayacahuite</i>	15	16.44	7.70	24.10	0.61	7.57	4.30	11.30	35					
	<i>Abies durangensis</i>	21	17.10	9.60	22.00	0.60	11.01	7.50	13.50	36					
	<i>Quercus sideroxyla</i>	14	17.29	9.00	22.50	0.62	8.45	3.50	12.90	35					
	<i>Picea chihuahuana</i>	11	16.72	8.70	31.60	0.34	10.16	7.50	13.40	30					
	<i>Pinus durangensis</i>	1	12.50	12.50	12.50	0.00	9.80	9.80	9.80	0					
Total	318														
Total general	460														

## CAPÍTULO II

### CONTENIDO DE CARBONO Y ESTRUCTURA HORIZONTAL DE UN BOSQUE TEMPLADO EN GUADALUPE Y CALVO, CHIHUAHUA

### CARBON STOCK AND HORIZONTAL STRUCTURE OF A TEMPERATE FOREST IN GUADALUPE Y CALVO, CHIHUAHUA



Fotografía: Arbolado de grandes dimensiones en el área de estudio.

Manuscrito sometido a la "Revista Mexicana de Ciencias Forestales" en junio de 2020.

## Resumen

Es importante conocer la estructura y la cantidad de carbono almacenado en los ecosistemas forestales, ya que estos representan uno de los principales sumideros de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este estudio se llevó a cabo en el ejido Chinatú, municipio de Guadalupe y Calvo, Chihuahua donde se realizó un muestreo aleatorio de ocho sitios circulares de 1000 m<sup>2</sup> distribuidos en 80.46 ha<sup>-1</sup> de superficie. Se analizó la estructura horizontal con base en el índice de valor de importancia (IVI) y clases diamétricas, además se determinó el cociente de mezcla, la riqueza y diversidad de especies de acuerdo con el índice de Margalef ( $D_{Mg}$ ) e índice de Shannon-Weaver ( $H'$ ), el carbono almacenado en la biomasa aérea se estimó a través de ecuaciones alométricas por medio del volumen para cada una de las especies. Se identificaron 10 especies con una densidad de 460 N ha<sup>-1</sup>, la especie de mayor valor ecológico (IVI) fue *Pseudotsuga menziesii* con 26.14%, la riqueza y diversidad obtenida fue de  $D_{Mg} = 1.47$  y  $H' = 1.96$  respectivamente, la distribución diamétrica se encuentra en forma de curva de Liocourt y balanceada y el contenido de carbono almacenado fue de 45.20 Mg C ha<sup>-1</sup>. Estos análisis muestran además que el bosque es homogéneo sin dominancia amplia de alguna especie en específico y se encuentra en buen estado de conservación ya que es evidente la presencia de individuos pequeños que posteriormente sustituirán a la masa madura.

**Palabras clave:** Biomasa, caracterización, CO<sub>2</sub>, diversidad, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, sumideros de carbono.

## Abstract

It is important to know the structure and amount of carbon stored in forest ecosystems is very important since they represent one of the main sinks of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) one of the greenhouse gases that has an impact on global climate change; this study was developed in the ejido Chinatú, municipality of Guadalupe y Calvo, Chihuahua where random samplings were carried from eight circular sites of 1000 m<sup>2</sup> distributed in 80.46 ha<sup>-1</sup> hectares of surface. The horizontal structure was analyzed based on the importance value index (IVI) and diametric classes, in addition, the mixing ratio, richness and diversity of species were

determined according to the Margalef index ( $D_{Mg}$ ) and Shannon-Weaver index ( $H'$ ), the carbon stored in the aerial biomass was estimated through allometric equations through volume for each of the species. Ten species with a density of  $460 \text{ N ha}^{-1}$  were identified, the species with the highest ecological value (IVI) was *Pseudotsuga menziesii* with 26.14%, the wealth and diversity obtained was  $D_{Mg} = 1.47$  and  $H' = 1.96$  respectively, the diametric distribution is in the form of a Liocourt curve and balanced and the stored carbon content was  $45.20 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . These analyzes show that the forest is homogeneous without broad dominance of any specific species and is in a good state of conservation since it is evident the presence of small individuals that will later replace the mature mass.

**Keywords:** Biomass, carbon sinks, characterization,  $\text{CO}_2$ , diversity, *Pseudotsuga menziesii*.

### **Introducción**

Los bosques cubren aproximadamente 30 % de la superficie terrestre y almacenan aproximadamente 45 % del carbono terrestre (Bonan, 2008), teniendo un papel importante en el ciclo global del carbono y la regulación del sistema climático global.

En México los bosques templados cubren alrededor de 20 % del territorio nacional; concerniendo 14 % a bosques de pino y pino-encino, 5 % a bosques de encino y 1 % a otras (Challenger, 1998; Rzedowski, 1991). Los bosques de *Pseudotsuga* no rebasan las 25,000 ha de superficie (Rzedowski, 1978); ubicándose en la Sierra Madre Occidental, Oriental y en el centro – sur del país (Castruita-Esparza *et al.*, 2016; García *et al.*, 2019; Ortega, 2017); sus poblaciones son pequeñas y fragmentadas (Reyes-Hernández, 2006).

Para realizar un manejo adecuado de los bosques es necesario caracterizar la estructura para entender su funcionamiento como base para la toma de decisiones (Aguirre-Calderón, 2015; Aguirre, Hui, Von Gadow y Jiménez, 2003; Corral, Aguirre, Jiménez y Corral, 2005; Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008).

La estructura forestal influye en las tasas y magnitudes de la acumulación de carbono en la biomasa viva y muerta, lo cual es relevante para la función de

regulación climática de los ecosistemas de bosques templados (Hardiman *et al.*, 2011; Urbano y Keeton, 2017).

Además, se sabe que bosques con especies como *Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) Franco muestran sensibilidad al cambio climático y la fisiología de los árboles mantiene estrecha relación con el aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico (Monserud & Marshall, 2001; Roden, Johnstone, & Dawson, 2011; Swetnam & Lynch, 1993).

En este contexto, el objetivo del presente estudio fue conocer la estructura horizontal, riqueza, diversidad y estimar el contenido de carbono de un bosque templado con presencia de especies en peligro como *Pseudotsuga menziesii*, con la finalidad de ofrecer información base para su conservación en Guadalupe y Calvo, Chihuahua.

### **Materiales y métodos**

El estudio se realizó en un bosque mixto constituido principalmente por *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* Engelm. y *Quercus tuberculata* Liebm; en el paraje “El Triste”, el cual se ubica en el ejido Chinatú, municipio de Guadalupe y Calvo, al suroeste del estado de Chihuahua entre las coordenadas 26°24' y los 106°64' (Figura 1). Cuenta con una superficie de 80.46 ha<sup>-1</sup> y altitudes entre los 2530 y 2830 m. Pertenece a la Región hidrológica Río Fuerte, a su vez a la provincia fisiográfica “Sierra Tarahumara” y dentro de la subprovincia “Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses”. El tipo de suelo predominante en el área es litosol y regosol una mínima parte. El clima está clasificado como templado subhúmedo, la temperatura media anual de la región es de 13.7 °C con una precipitación media anual de 1,126.8 mm (Chávez, 2009).

### **Evaluación en campo**

Para evaluar la comunidad vegetal se establecieron ocho sitios circulares de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>, los cuales fueron distribuidos aleatoriamente (Figura 1) En los sitios de muestreo se consideraron los individuos con diámetro normal (d<sub>1.30</sub>) ≥ 7.5 cm para el arbolado adulto y los menores de 7.5 cm, pero mayores a 0.25 m de altura total para la regeneración (CONAFOR, 2012). A cada individuo se le registró la altura total (h) con un hipsómetro Suunto Pm-5, el diámetro normal

(DAP) con una cinta diamétrica Forestry Suppliers, el diámetro de copa con una cinta métrica de 100 m fibra de vidrio cruceta Truper® (norte – sur y este – oeste) y se registró la especie a la que pertenecía cada individuo.

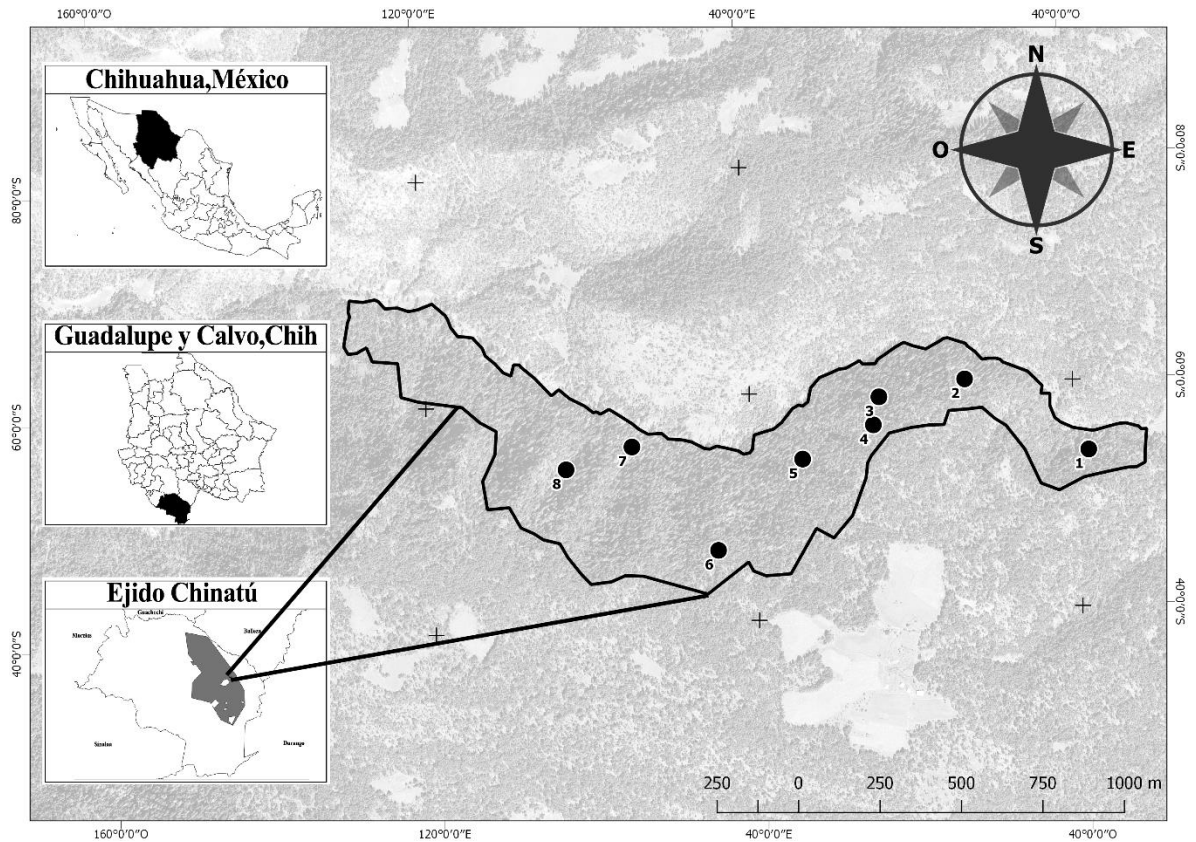


Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo.

### **Riqueza, diversidad y estructura horizontal**

Se calcularon los valores absolutos y relativos de abundancia, dominancia y frecuencia, luego se obtuvo el valor promedio para cada especie y se generó el Índice de Valor de Importancia (IVI), además se determinó el cociente de mezcla el cual permite tener una idea general de la intensidad de mezcla (CM) (Alvis, 2009); la diversidad de la comunidad vegetal se evaluó utilizando el índice de Shannon-Weiner ( $H'$ ) (Shannon, 1948), índice de Margalef ( $D_{Mg}$ ) (Magurran, 2004) (Tabla 1).

Tabla 1. Índice de Valor de Importancia (IVI), cociente de mezcla (CM), e índice de riqueza ( $D_{Mg}$ ) y diversidad ( $H'$ ).

Índices		Descripción
Índice de Valor de Importancia (IVI)	$IVI = A_r + F_r + D_r$	Donde: IVI = Índice de valor de importancia. $A_r$ = Abundancia relativa. $D_r$ = Dominancia relativa. $F_r$ = Frecuencia relativa.
Cociente de mezcla (CM)	$CM = \frac{S}{N} \frac{\bar{S}}{\bar{N}}$	Donde: S: Número total de especies en el muestreo. N: Número total de individuos en el muestreo.
Margalef ( $D_{Mg}$ )	$D_{Mg} = \frac{(S - 1)}{\ln(N)}$	Donde: S= número de especies. N=número total de individuos.
Shannon-Weiner ( $H'$ )	$H' = -\sum_{i=1}^S p_i \times \ln(p_i)$ $p_i = n_i / N$	Donde: S= número de especies. $P_i$ = proporción de individuos de la especie $i$ .

### Estimación de volumen, biomasa y contenido carbono

El cálculo del volumen se determinó de acuerdo con la fórmula de volumen total árbol con corteza ( $Vta_{cc}$ ) y los parámetros propuestos por Vargas-Larreta *et al.* (2017) (Tabla 2).

$$Vta_{cc} = b_0 * D^{b1} * h^{b2} + b_3 * D^2$$

Donde:

$D$  = diámetro normal del árbol  $i$  (cm)

$h$  = altura total del árbol  $i$  (m)

$b_i$  = coeficientes propuestos

Tabla 2. Parámetros del modelo para la estimación de volumen de las especies evaluadas.

<b>Especie</b>	<b>b0</b>	<b>b1</b>	<b>b2</b>	<b>b3</b>
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	0.000085	1.995095	0.764492	0.000050
<i>Pinus arizonica</i>	0.000067	1.783568	1.098266	0.000063
<i>Pinus ayacahuite</i> C.Ehrenb. ex Schltldl.	0.000082	2.102772	0.606456	0.000054
<i>Abies durangensis</i> Martínez	0.000066	1.788316	1.055175	0.000013
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	0.000142	1.483474	1.121788	0.000116
<i>Juniperus deppeana</i> Steud	0.000591	1.338876	0.707074	0.000029
<i>Picea chihuahuana</i> Martínez	0.000061	1.992235	0.869354	0.000057
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0.000062	1.882421	0.946587	0.000010
<i>Quercus sideroxyla</i> Bonpl.	0.000188	1.851694	0.572656	0.000044
<i>Quercus tuberculata</i> .	0.000188	1.851694	0.572656	0.000044

La determinación de la biomasa se efectuó multiplicando el volumen por la densidad de la madera de cada una de las especies (Tabla 3) y la cantidad de individuos ( $N\ ha^{-1}$ ) registrados. Posteriormente se determinó el contenido de carbono multiplicando el valor de la biomasa por la concentración de carbono 0.5 (Change, 2006; 2003; Ordóñez, 2008).

Tabla 3. Densidad de la madera de las especies evaluadas para el predio “El Triste” del ejido Chinatu en Guadalupe y Calvo, Chihuahua.

<b>Especie</b>	<b>Densidad (<math>g\ cm^{-3}</math>)</b>	<b>Fuente</b>
<i>Pinus durangensis</i>	0.47	Silva-Arredondo, 2012
<i>Pinus arizonica</i>	0.43	Sotomayor, 2008
<i>Pinus ayacahuite</i>	0.37	Vázquez-Cuecuecha, 2015
<i>Abies durangensis</i>	0.38	Sotomayor, 2008
<i>Arbutus xalapensis</i>	0.75	Ordóñez <i>et al.</i> , 2015
<i>Juniperus deppeana</i>	0.46	Nájera y García, 2009
<i>Picea chihuahuana</i>	0.42	Sotomayor-Castellanos, 2012
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0.45	Zanne <i>et al.</i> , 2009
<i>Quercus sideroxyla</i>	0.61	De la Paz y Dávalos, 2008
<i>Quercus tuberculata</i>	0.77	Silva-Arredondo, 2012

## Resultados y discusión

La comunidad vegetal evaluada está integrada por 10 especies con una densidad total de 460 N ha<sup>-1</sup>, distribuidos en siete géneros de cuatro familias. Las familias de mayor representatividad fueron la Pinaceae con seis especies y Fagaceae con dos. El número de especies registradas (10) es similar a lo reportado por Álvarez *et al.* (2004) quienes evaluaron un bosque de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido “La Barranca” en Pinal de Amoles, Querétaro, pero menor a lo encontrado por Encina-Domínguez *et al.* (2008) quienes evaluaron un bosque de oyamel en la sierra de Zapalinamé, Coahuila.

La distribución diamétrica del bosque presenta una tendencia exponencial negativa en forma de curva de Liocourt o “J invertida” (Figura 2), revelando que la comunidad estudiada se encuentra en proceso de regeneración y un desarrollo hacia etapas de crecimiento mayores. Existe una alta cantidad de individuos jóvenes que sustituirán a la comunidad vegetal madura que cuenta con árboles probablemente en fase longeva, pertenecientes a las clases diamétricas superiores (Arruda *et al.* 2011; Hernández-Stefanoni *et al.* 2011). Investigaciones desarrolladas en México han indicado resultados similares, como López-Hernández *et al.* (2017) en un bosque templado de Puebla y Encina-Domínguez *et al.* (2008) en un bosque de Oyamel en Coahuila. En otras localidades se han registrado estructuras irregulares y desbalanceadas, como Guerra *et al.* (2012) quienes evaluaron poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* en Tlaxcala y Puebla.

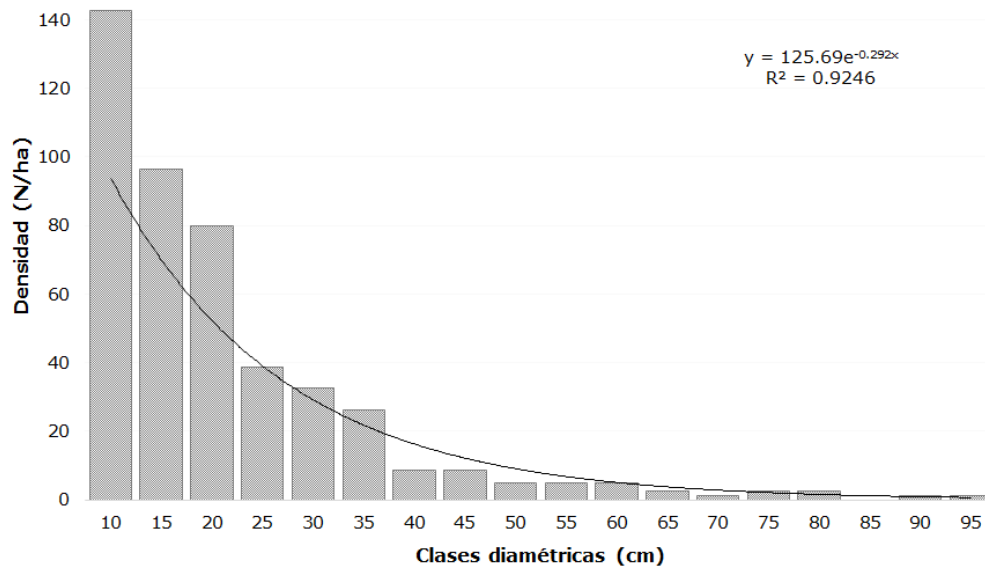


Figura 2. Densidad de especies arbóreas por clase diamétrica.

Las especies con mayor densidad fueron *Pseudotsuga menziesii* con  $154 \text{ N ha}^{-1}$ , *Pinus arizonica* con  $83 \text{ N ha}^{-1}$  y *Quercus tuberculata* con  $48 \text{ N ha}^{-1}$ , mientras que la especie con menor densidad fue *Pinus durangensis* con tan sólo  $5 \text{ N ha}^{-1}$  (Tabla 4). La superioridad de *Pseudotsuga menziesii* sobre especies de pino o encino también la señalan Domínguez-Calleros *et al.* (2014) en un predio en Chalchihuites, Zacatecas con  $324 \text{ N ha}^{-1}$ , mientras que Aguirre-Calderón *et al.* (2003) mencionan que para el cerro El Potosí en Galeana, Nuevo León la densidad es de  $240 \text{ N ha}^{-1}$ .

El área basal (dominancia) del área de estudio resultó ser de  $18.72 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , similar a lo reportado por Hernández-Salas *et al.* (2013) quienes obtuvieron entre  $19.58 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$  y  $23.70 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$  en bosques templados del ejido “El Largo” en Madera, Chihuahua, sin embargo el valor es bajo contrastado con lo detallado por Encina-Domínguez *et al.* (2008) y Domínguez-Calleros *et al.* (2014) quienes obtuvieron  $29.69 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$  y  $34.43 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$  respectivamente. Las especies que mayor dominancia tuvieron fueron *Pseudotsuga menziesii* con  $5.23 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , *Quercus tuberculata* con  $4.50 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , *Pinus arizonica* con  $2.47 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$  y *Arbutus xalepensis* con  $2.34 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , en conjunto estas representan porcentualmente el 77.63%. La menor dominancia fue obtenida por *Picea chihuahuana* con  $0.46 \text{ G m}^2 \text{ ha}^{-1}$  (2.47 %).

La mayor frecuencia en el muestreo la presentó *Pseudotsuga menziesii* con 17.07 % apareciendo en 7 sitios, seguida de *Quercus tuberculata*, *Pinus arizonica* y *Arbutus xalapensis* con 14.62 % presentándose en 6 sitios. *Picea chihuahuana* fue la especie con menor frecuencia, registrándose solamente en un sitio. Gordon (1968) y García y González (1998) mencionan que existen muy pocas y pequeñas poblaciones de *P. chihuahuana* en la Sierra Madre Occidental, que son consideradas como un elemento relicto endémico.

De acuerdo con los valores relativos de densidad, dominancia y frecuencia se determinó el índice de valor de importancia (IVI), resultando *Pseudotsuga menziesii* como la especie de mayor valor ecológico con un 26.14 %, seguida por *Quercus tuberculata* con 16.33 % y *Pinus arizonica* 15.25%, estas tres especies representan el 57.71 % del IVI. *Picea chihuahuana* fue la especie con el menor valor obteniendo 2.63 %. Guerra *et al.* (2012) mencionan que *Pseudotsuga menziesii* convive con especies de encinos y coníferas tolerantes como el Oyamel.

Tabla 4. Valores de densidad, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia.

Especie	Densidad		Dominancia		Frecuencia	IVI	
	N ha <sup>-1</sup>	(%)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	(%)	N/Sitio (%)	(%)	(%)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	154	33.42	5.23	27.92	7	17.07	26.14
<i>Quercus tuberculata</i>	48	10.33	4.50	24.02	6	14.63	16.33
<i>Pinus arizonica</i>	83	17.93	2.47	13.17	6	14.63	15.25
<i>Arbutus xalapensis</i>	43	9.24	2.34	12.52	2	4.88	8.88
<i>Juniperus deppeana</i>	38	8.15	0.78	4.18	5	12.20	8.17
<i>Pinus ayacahuite</i>	21	4.62	0.71	3.79	6	14.63	7.68
<i>Abies durangensis</i>	40	8.70	1.19	6.36	3	7.32	7.46
<i>Quercus sideroxyla</i>	16	3.53	0.41	2.17	3	7.32	4.34
<i>Pinus durangensis</i>	5	1.09	0.64	3.40	2	4.88	3.12
<i>Picea chihuahuana</i>	14	2.99	0.46	2.47	1	2.44	2.63
Total general	460	100.00	18.72	100.00	41	100.00	100.00

IVI = Índice de Valor de Importancia.

El cociente de mezcla (CM) mostró un valor de 1:46, revelando que por cada 46 individuos es posible encontrar una especie diferente. Este tipo de bosque puede considerarse entonces, como homogéneo, otros tipos de bosques como el ripario subandino muestran mayor heterogeneidad como el evaluado por Chaves y Rodríguez (2012) en Cordillera Occidental de los Andes, Colombia que mostró un CM de 1:8. Melo (2019) menciona CM desde los 1:04 hasta 1:34 para fragmentos de bosque seco tropical en Tolima, Colombia.

La riqueza de especies en el bosque de acuerdo con el índice de Margalef ( $D_{Mg}$ ) fue de 1.47, mayor a lo registrado por López-Hernández *et al.* (2017) quienes obtuvieron un  $D_{Mg} = 1.35$  en bosques templados de Puebla, México. También fue mayor a lo registrado por Návar-Cháidez y González-Elizondo (2009) en un bosque templado de Durango que obtuvieron un  $D_{Mg} = 1.04$  y Hernández-Salas *et al.* (2013) que encontraron valores de  $D_{Mg} = 0.81, 0.91$  y  $0.90$  en tres evaluaciones de distintos periodos.

La diversidad con base al índice de Shannon ( $H'$ ) arrojó un valor de  $H'=1.96$ , el cual indica una baja diversidad, ya que de acuerdo con Margalef (1972) el índice tiene un rango de 1 a 5, donde valores menores a 2 demuestran baja diversidad. Lo aquí obtenido es similar al valor de  $H'=1.82$  obtenido por García-Aranda *et al.* (2011) en un bosque templado con presencia de *Pseudotsuga menziesii* en Zaragoza, N. L. Sin embargo, es superior a lo descrito en otros estudios, tal es el caso de Návar y González (2009) quienes registraron valores de  $H'=0.53$  a  $1.33$  para el rodal Cielito Azul en Durango, González (2018) que obtuvo un valor de  $H'=1.76$  en un bosque de *Abies vejarii* Martínez en Nuevo León y Delgado *et al.* (2015) quienes reportaron valores de  $H'=0.77$  a  $H'=1.58$  en Pueblo Nuevo, Durango. De acuerdo con estos valores el índice indica que la comunidad vegetal evaluada presenta una mayor diversidad que otros bosques templados en México.

Referente al volumen presente en las especies del bosque se obtuvo un total de  $168.58 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . *Quercus tuberculata*, *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus arizonica* fueron las especies que mayor volumen presentaron, con  $49.24, 37.64$  y  $26.14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  respectivamente. La biomasa presente en las especies mostró valores

entre 1.85 Mg ha<sup>-1</sup> y 28.98 Mg ha<sup>-1</sup>, las mismas especies se comportaron de manera similar en biomasa añadiéndose también *Arbutus xalepensis* como una de las especies que más aportan. Respecto al contenido de carbono almacenado se determinó que el bosque tiene en total 45.29 Mg C ha<sup>-1</sup>, *Quercus tuberculata* y *Pseudotsuga menziesii* quienes tuvieron mayor valor de importancia también presentaron el mayor contenido de carbono con 14.49 Mg C ha<sup>-1</sup> y 11.08 Mg C ha<sup>-1</sup>, seguidos de *Pinus arizonica* (5.62 Mg C ha<sup>-1</sup>) y *Arbutus xalepensis* (5.16 Mg C ha<sup>-1</sup>) que también ocuparon los primeros lugares en IVI. La especie con menor volumen, biomasa y contenido de carbono fue *Picea chihuahuana* atribuible a su bajo valor de importancia (Cuadro 5). Estudios similares en bosque de *Abies religiosa* fueron realizados por Ávila-Akerbergc (2010), quien registró un promedio de 108 Mg C ha<sup>-1</sup>, por su parte Razo *et al.* (2013) calcularon 138.69 Mg C ha<sup>-1</sup> en bosque de oyamel en Hidalgo, de manera similar Ordóñez, (2015) estimó 103.1 Mg C ha<sup>-1</sup> en bosques bajo manejo de San Pedro Jacuaro, Michoacán, también González (2008) obtuvo un promedio de 80.98 Mg C ha<sup>-1</sup> para bosques con dominancia de *Pinus maximinoi* y 71 Mg C ha<sup>-1</sup> en rodales con dominancia de *Pinus oocarpa* en el Norte de Chiapas, México, finalmente Martínez (2016) indica que en bosques templados de Durango, México se capturan 26.87 Mg C ha<sup>-1</sup>.

Tabla 5. Valores de volumen, biomasa y contenido de carbono.

Especie	Volumen	Biomasa	Carbono
	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>	Mg C ha <sup>-1</sup>
<i>Quercus tuberculata</i>	37.64	28.98	14.49
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	49.24	22.16	11.08
<i>Pinus arizonica</i>	26.14	11.24	5.62
<i>Arbutus xalepensis</i>	13.77	10.33	5.16
<i>Abies durangensis</i>	13.68	5.20	2.60
<i>Pinus durangensis</i>	8.44	3.97	1.98
<i>Pinus ayacahuite</i>	7.49	2.77	1.38
<i>Quercus sideroxyla</i>	3.36	2.05	1.02
<i>Juniperus deppeana</i>	4.41	2.03	1.02
<i>Picea chihuahuana</i>	4.42	1.85	0.93
Total	168.58	90.57	45.29

## CAPÍTULO III

### PATRONES DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ARBOLADO EN UN BOSQUE DE *PSEUDOTSUGA MENZIESII* EN CHIHUAHUA, MÉXICO

### SPATIAL DISTRIBUTION PATTERNS OF TREES IN A *PSEUDOTSUGA MENZIESII* FOREST IN CHIHUAHUA, MEXICO



Fotografía: Vista panorámica del área de estudio “El Triste” en el ejido Chinatú, Mpio. de Guadalupe y Calvo, Chihuahua.

Manuscrito sometido a la “Revista Mexicana de Biodiversidad” en junio de 2020.

## Resumen

El objetivo de este estudio fue caracterizar los patrones de distribución espacial de un bosque maduro en el Estado de Chihuahua, México, donde coexisten coníferas de importancia para la conservación como *Pseudotsuga*, *Picea* y *Abies*. Se utilizó un análisis de patrón de puntos para evaluar mezcla de especies, diferenciación y dominancia dimensional. Los datos se obtuvieron de ocho sitios de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>. Se analizaron de manera general 203 grupos estructurales, *Pseudotsuga* generó 84, *Quercus* 22 y *Pinus* 42, reflejando una distribución aleatoria de acuerdo al índice de uniformidad de ángulos ( $W_i$ ), mientras que el grado de mezcla ( $M_i$ ) manifestó que la especie referencia cuenta con más de 2 vecinos de diferente especie, no se registraron diámetros y alturas dominantes de manera general ya que ( $UD_i$ ) y ( $UH_i$ ) mostraron valores similares en cada uno de los grados de dominancia, la diferenciación dimensional ( $TD_i$ ), ( $TH_i$ ) fue moderada, similar a estudios en bosques perturbados y bajo manejo. El conocimiento de la dinámica de bosques maduros es vital para una descripción precisa de las relaciones entre especies de manera más auténtica y puede ser base para la conservación o futuras restauraciones en áreas perturbadas.

**Palabras clave:** Conservación, dinámica, diferenciación dimensional, dominancia dimensional índice de mezcla de especies, Sierra Madre Occidental.

## Abstract

The objective of this study was to characterize the tree spatial structure patterns of the mature forest in the Chihuahua, Mexico state, where conifers of conservation importance coexist as *Pseudotsuga*, *Picea* and *Abies*. The data were collected from 8 sampling sites of 1000 m<sup>2</sup>. They were analyzed in a general way 203 structural groups, *Pseudotsuga* generated 84, *Quercus* 22 y *Pinus* 42, these reflected a random distribution according to index ( $W_i$ ), while the degree of mixing ( $M_i$ ) stated that the reference species has more than 2 neighbors of different species, no dominant diameters and heights were generally recorded as ( $UD_i$ ) and ( $UH_i$ ) showed similar values in each of the degrees of dominance, the dimensional differentiation ( $TD_i$ ), ( $TH_i$ ) it was moderate, similar to studies in

disturbed and under-managed forests. Knowledge of the dynamics of mature forests is vital for a more accurate description of the relationships between species in a more authentic and it can be the basis for conservation or future restorations in disturbed areas.

**Keywords:** Conservation, dynamics, dimensional differentiation, dimensional dominance, species mix index, Sierra Madre Occidental.

## **Introducción**

Los bosques templados brindan una serie de servicios ecosistémicos como la regulación del clima, captura de carbono y contribuyen a la recarga de mantos acuíferos, entre otros (Solís, 2018). Sin embargo, algunos bosques presentan distintas alteraciones (Mápula et al., 2007; Velasco-García et al., 2007). Debido a ello, es necesario generar información sobre la estructura de estos bosques a nivel rodal, que brinde soporte para la toma de decisiones sobre su manejo, conservación y restauración.

La estructura del bosque puede ser caracterizada a nivel de diversidad de especies, dimensiones y a nivel espacial (Chávez et al., 2020; Gadow, 2007; Kulik et al., 2019; Lin et al., 2020; Mena-Mosquera et al., 2020; Pommerening et al., 2020). Sin embargo, la investigación sobre estructura forestal en México ha sido enfocada a caracterizar la diversidad de especies y de dimensiones, siendo la distribución espacial una de las menos utilizadas, aunque brindan un mayor nivel de detalle. Estos estudios son importantes para determinar los cambios que originan los patrones y la variación espacial de la estructura del rodal, así como los efectos en la subsecuente sucesión de los ecosistemas forestales a escala de rodal (Yu et al., 2009; Gu et al., 2019).

Los análisis estructurales se han realizado a través de distintos índices y métodos que brindan información para la descripción de los ecosistemas; por ejemplo la estructura horizontal y vertical ha sido evaluada por medio del Índice de Valor de Importancia (IVI), diagramas de perfil (Ogawa et al., 1965; UNESCO, 1980), determinando pisos de altura (Lamprecht, 1990) o por medio del índice de *A* (Pretzsch, 2009); mientras que las relaciones de vecindad se han descrito usando

el método de muestreo de los cinco árboles, desarrollado para evaluar los atributos estructurales (dimensiones, especies y la regularidad de sus posiciones) de los árboles (Aguirre et al., 2003; Gadow et al., 2001).

En algunos estudios llevados a cabo tanto en nuestro país como a nivel internacional se ha evaluado la estructura y distribución espacial de comunidades forestales, tratando de responder a distintas preguntas de investigación. En bosques templados, por ejemplo, se han utilizado para caracterizar la estructura de rodales con algún grado de perturbación (Ávila-Flores et al., 2014; Rubio-Camacho et al., 2017), también para comprender la distribución espacial de comunidades arbóreas como bosques de pino – encino en Oaxaca y bosques subtropicales caducifolios en China (Castellanos et al., 2010; Du et al., 2017), conocer relaciones interespecíficas entre especies (Wédjangnon, 2020). Asimismo, se han utilizado para contrastar la estructura de bosques con y sin manejo forestal (García et al., 2013; García et al., 2019; Hernández et al., 2013) y para diseñar patrones de plantación que aumenten la competencia asimétrica y la resistencia de los ecosistemas (Zhang et al., 2019).

Sin embargo, existen escasos estudios que evalúen los patrones de distribución espacial en bosques de alto valor de conservación, que presentan comunidades vegetales con especies vulnerables. Un ejemplo de estos ecosistemas es el bosque de *Pseudotsuga menziesii*, que tiene escasa distribución natural en nuestro país, encontrándose en la Sierra Madre Occidental y Oriental, así como en el centro – sur del país. Las poblaciones *P. menziesii* se encuentran fragmentadas en rodales o manchones aislados, normalmente dominados por otras especies (Debreczy y Racz (1995); Domínguez-Calleros et al., 2014; Rzedowski, 1978).

Diversos factores amenazan los bosques de *Pseudotsuga* en México, ya que tiene problemas de regeneración y desarrollo (Torres, 2006; Mápula et al., 2007). Entre los factores más importantes se encuentran el cambio de uso de suelo, incendios, sobrepastoreo, tala clandestina y plagas (Mápula et al., 2007; Ventura et al., 2010; Velasco et al., 2007). Sin embargo, uno de los factores que más

efectos podría tener es el cambio climático, ya que las poblaciones de *Pseudotsuga mezieisii* emigraron hacia el sur durante las glaciaciones, por lo que son sensibles a los cambios de temperatura a nivel global ocasionando, por un lado que las áreas con condiciones adecuadas para su desarrollo y establecimiento se reduzcan y contraigan hacia las partes más altas de los sistemas montañosos y hacia el hemisferio norte (Hermann, 1985; Mápula-Larreta et al., 2008). De ahí que el hábitat de *Pseudotsuga mezieisii* esté compuesto de especies altamente especializadas, con alta biodiversidad y alto número de especies amenazadas (Schwendtner y Muñoz et al., 2005).

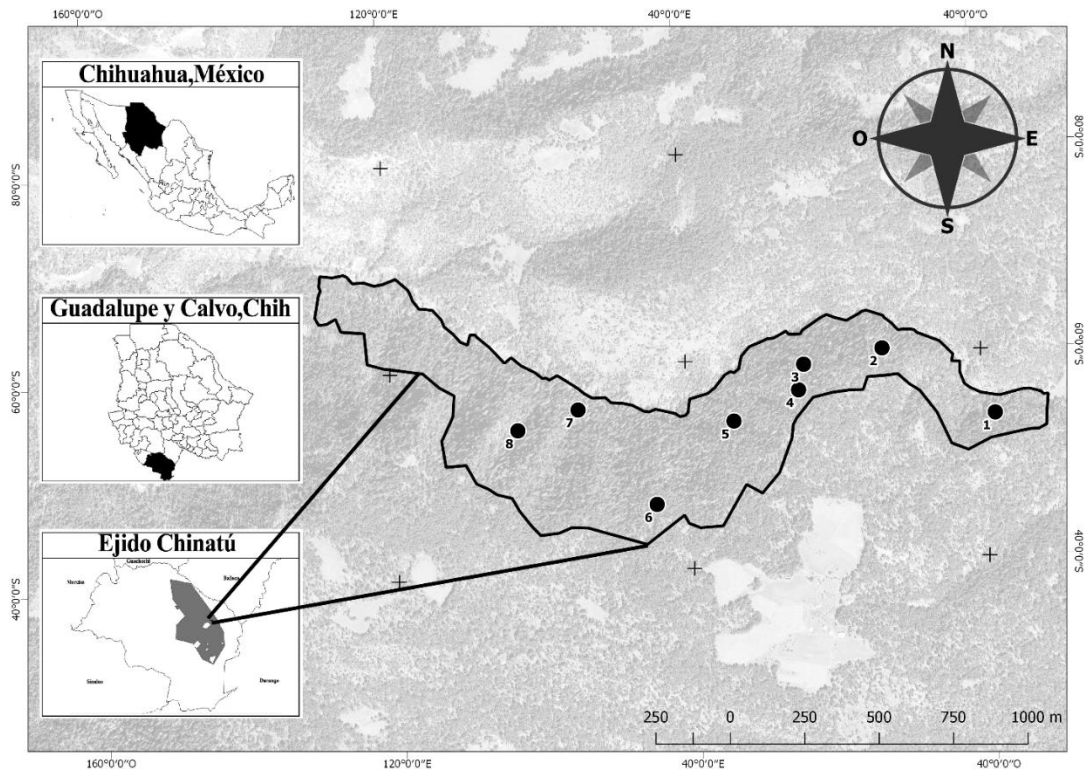
El propósito principal de este trabajo de investigación es aportar al conocimiento y entendimiento de la estructura espacial de bosques con alto valor de conservación. Donde en un área relativamente pequeña ( $80.46 \text{ ha}^{-1}$ ) coexisten especies como *Pseudotsuga mezieisii* sujeta a protección especial (Pr), *Picea Chihuahuana* en peligro de extinción (P) de acuerdo con la NOM-059-ECOL-2001. Además, existen individuos de *Abies durangensis*, especie endémica de la Sierra Madre Occidental (SMO). Para ello, nos hemos planteado las siguientes preguntas de investigación: 1) ¿La distribución del arbolado es aleatoria? 2) ¿La mezcla de especies es uniforme? 3) ¿Existe homogeneidad dimensional a nivel espacial? 4) ¿Cuáles son las principales diferencias y/o similitudes con otros estudios? Dar respuesta a estas preguntas proporcionará información básica para la toma de decisiones en cuanto al manejo, conservación y restauración de estos ecosistemas de alta importancia ecológica, económica y social.

## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en el paraje “El Triste”, ubicado en el ejido Chinatú, municipio de Guadalupe y Calvo, al suroeste del estado de Chihuahua. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas  $26^{\circ}24'$  y los  $106^{\circ}64'$  (Figura 1). Dicho bosque tiene una superficie de  $80.46 \text{ ha}^{-1}$  y altitudes entre los 2530 y 2830 m snm. Pertenece a la Región hidrológica Río Fuerte, a su vez a la provincia fisiográfica Sierra Tarahumara y a la subprovincia Gran Meseta y

Cañones Chihuahuenses. El tipo de suelo predominante en el área es litosol. El clima de la región está clasificado como templado subhúmedo, con temperatura media anual de 13.7 °C y una precipitación pluvial media anual de 1 126.8 mm (Chávez, 2009). El bosque está conformado principalmente por *P. menziesii*, *P. arizonica* y *Quercus tuberculata*, con presencia de especies importantes para la conservación como *Abies durangensis* y *Picea chihuahuana*. Dicha área se encuentra catalogada como “Relicto de bosque viejo o sobremaduro” de acuerdo con Galván-Moreno (2016) y se encuentra excluida del aprovechamiento forestal en el programa de manejo.



·Figura 1. Localización del área de estudio y sitios de muestreo.

### Toma de datos

Se establecieron ocho sitios aleatorios circulares de 1000 m<sup>2</sup> para el levantamiento de información. Dicho número de sitios se determinó de acuerdo con un pre-muestreo realizado y de acuerdo con una intensidad de muestreo del 1 %. Se consideraron individuos con diámetro normal (DN) ( $d_{1.30}$ )  $\geq 7.5$  cm, además se registró la altura total (h, m), distancias de los árboles al centro del sitio, azimut y especie de cada individuo.

## **Análisis de la información**

Se realizó el cálculo la densidad ( $N\ ha^{-1}$ ), el área basal ( $m^2\ ha^{-1}$ ), diámetro normal promedio ( $d_{1.30}$  (cm)) y la altura total (m) promedio para conocer de manera general de las características dasométricas de cada uno de los géneros presentes en el bosque. La caracterización de los patrones de distribución espacial del bosque se obtuvo utilizando técnicas de análisis de patrón de puntos y relaciones de vecindad basados en el método de los 5 árboles (Albert, 1999; Hui y Hu, 2001) el cual toma un árbol de referencia ( $i$ ) y sus 4 vecinos más cercanos.

*Índice de uniformidad de ángulos ( $W_i$ )*. Se basa en la medición de los ángulos entre los vecinos a un árbol de referencia  $i$  y su comparación con un ángulo estándar  $\alpha$ , 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 0.5 muestran tendencia a la aleatoriedad y los próximos a 1 presentan condiciones de agrupamiento (Gadow et al., 1998):

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

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

*Grado de mezcla en la distribución espacial de especies*. Se calculó con base en el Índice de mezcla de especies ( $M_i$ ) el cual es una medida de la diversidad en la distribución espacial de especies mostrando el grado de mezcla entre estas, Fuldner (1995) define este índice 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 4 vecinos más cercanos.

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

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 et al., 2007).

*Dominancia dimensional ( $U_i$ )*. Se define como la dominancia del árbol referencia  $i$  con respecto a sus vecinos más cercanos, es decir, la proporción 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. Con 4 vecinos el índice de dominancia  $U_i$  puede tomar 5 valores y es muy útil cuando se desea ver la dominancia relativa de una especie en particular (Aguirre, Hui, von Gadow y Jiménez, 2003; Gadow et al., 2007).

*Diferenciación dimensional ( $T_i$ )*. se puede aplicar a cualquier variable representativa de las dimensiones del arbolado, en este caso para diámetros y alturas. El grado de diferenciación dimensional establece una manera de representación de la proximidad espacial que existe entre árboles de diferentes dimensiones en el bosque. Toma en cuenta los  $n$  árboles más cercanos al árbol de referencia  $i$  y se define de la siguiente manera:

$$T_i = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\min(Dim_i, Dim_j)}{\max(Dim_i, Dim_j)}$$

donde  $T_i$  = grado de diferenciación en diámetros o/y alturas,  $j = 1 \dots n$  árboles vecinos,  $i$  = árbol de referencia,  $Dim_i$  = diámetro o altura del árbol  $i$ ,  $Dim_j$  = diámetro o altura del árbol  $j$ .

El valor del  $T_i$  se incrementa al aumentar la diferencia media del tamaño de los árboles vecinos ( $0 \leq T_i \leq 1$ ). Entre más bajo sea el valor de  $T_i$  las diferencias son menores, un valor de 0 indica que todos los árboles son del mismo tamaño (Gadow et al., 2007). Siguiendo el método de Aguirre, Kramer y Jiménez (1998),

y Jiménez, Aguirre y Kramer (1998), el grado de diferenciación en diámetros y alturas se clasificó en 5 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.

El cálculo de los índices se ejecuta dentro de una ventana de observación ( $W$ ), que esta vez son los sitios circulares de muestreo. En dichos sitios se realiza cada uno de los análisis de la información con las fórmulas previamente descritas. Considerándose el efecto de borde de la ventana (Pommerening y Stoyan, 2006), este efecto desempeña un papel importante para la correcta caracterización de la estructura espacial.

Para una correcta interpretación de las características estructurales en el espacio se debe tomar en cuenta el efecto de borde, ya que hay árboles dentro de los sitios de muestreo que se encuentran cerca del borde  $W$  y normalmente tienen a sus vecinos más cercanos del otro lado. Lo anterior implica errores en la estimación de los valores de vecindad de los árboles que se encuentran dentro. Con la finalidad de evitar errores se utilizó el estimador NN1 el cual consiste en omitir como árbol de referencia ( $i$ ) a aquellos cuya distancia a su  $j$ -ésimo vecino más cercano sea menor a la distancia entre este y el borde de  $W$ , pese a esto pueden formar parte de otros grupos estructurales como vecino más cercano (Pommerening y Stoyan, 2006).

Con el objetivo de comparar estadísticamente los índices antes mencionados con bosques perturbados o bajo manejo, se amplió la base de datos a 1,000 submuestras utilizando la paquetería “WRS2” en el programa “R” (R Core Team, 2019), mediante la cual se usaron simulaciones “Bootstrap” para calcular la diferencia entre medias con un IC del 95% (Mair, Wilcox y Schoenbrodt, 2015; Wilcox, 2005).

## **Resultados**

Los resultados de distribución espacial se muestran para el bosque en general y por géneros (*Pseudotsuga*, *Quercus* y *Pinus*), por ser los más abundantes, de mayores dimensiones y más investigados en este aspecto. La densidad total fue

de 254 N ha<sup>-1</sup> con un área basal de 10.14 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> siendo *Pseudotsuga* el género más importante (Tabla 1).

Tabla 1. Características dasométricas del área de estudio.

<b>Género</b>	<b>N/ha<sup>-1</sup></b>	<b>G (m<sup>2</sup>/ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>d<sub>1.30</sub> (cm)</b>	<b>h (m)</b>
<i>Pseudotsuga</i>	105	3.4780	21.24	11.04
<i>Quercus</i>	28	1.7196	21.45	10.94
<i>Pinus</i>	53	1.6963	21.30	10.99
<i>Arbutus</i>	34	2.2618	21.29	10.96
<i>Juniperus</i>	16	0.5176	21.27	10.82
<i>Abies</i>	13	0.2504	21.71	10.92
<i>Picea</i>	6	0.2194	21.87	10.72
<b>Total</b>	<b>254</b>	<b>10.143</b>		

N = número de individuos, G = área basal, d<sub>1.30</sub> = Diámetro normal promedio, h = altura promedio.

*Distribución espacial del arbolado.* En la figura 2 se muestra la distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios después de usar el estimador NN1, es decir, sólo se muestran los árboles que pueden ser el árbol i del grupo estructural. Como resultado, en el análisis de los índices de vecindad se utilizaron un total de 203 grupos estructurales de los cinco árboles para el bosque en general, siendo los sitios dos y seis donde se conformó una mayor cantidad de grupos, 41 y 54 respectivamente; *Pseudotsuga* generó 84 grupos estructurales, *Quercus* 22 y *Pinus* 42.

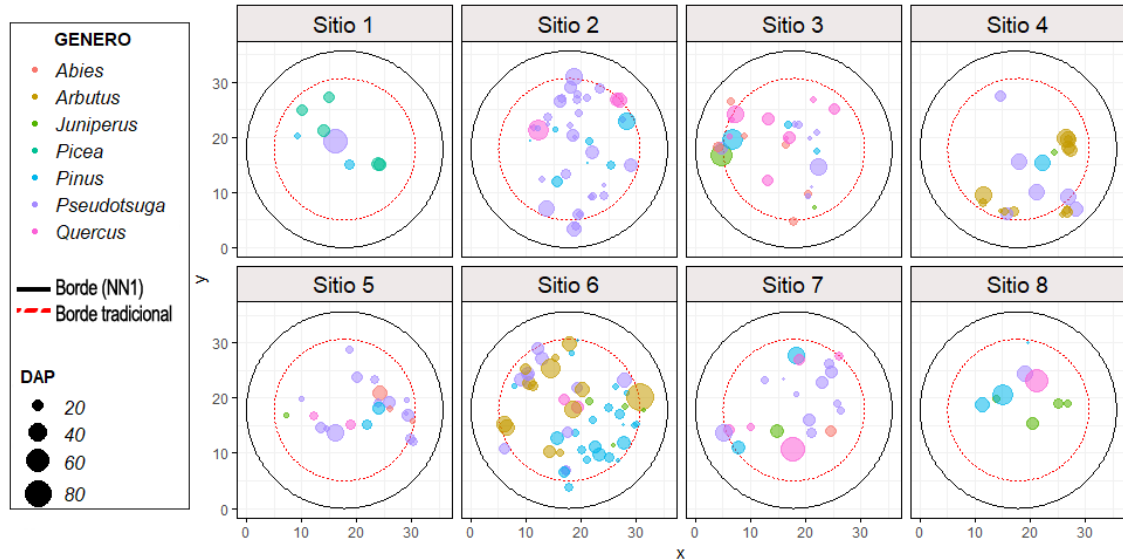


Figura 2. Distribución espacial del arbolado en cada uno de los sitios por género.

*Uniformidad de ángulos ( $W_i$ )*. En el análisis general, los resultados muestran una media ( $\bar{x}$ ), generada con la simulación Bootstrap, de 0.49 con un intervalo de confianza [0.45-0.53], evidenciando así una distribución aleatoria. En la figura 3 se puede observar que la mayoría de los grupos estructurales se ubican en la categoría 0.5, indicando que 2 de los 4 árboles vecinos tienen un ángulo menor a  $90^\circ$ . De igual manera el análisis por género presentó una distribución aleatoria, *Pseudotsuga* ( $\bar{x} = 0.44$  [0.37-0.50]); mientras que *Quercus* y *Pinus* presentaron ( $\bar{x} = 0.47$  [0.39-0.53]) y ( $\bar{x} = 0.49$  [0.40-0.57]) respectivamente, con ligera tendencia a una distribución regular.

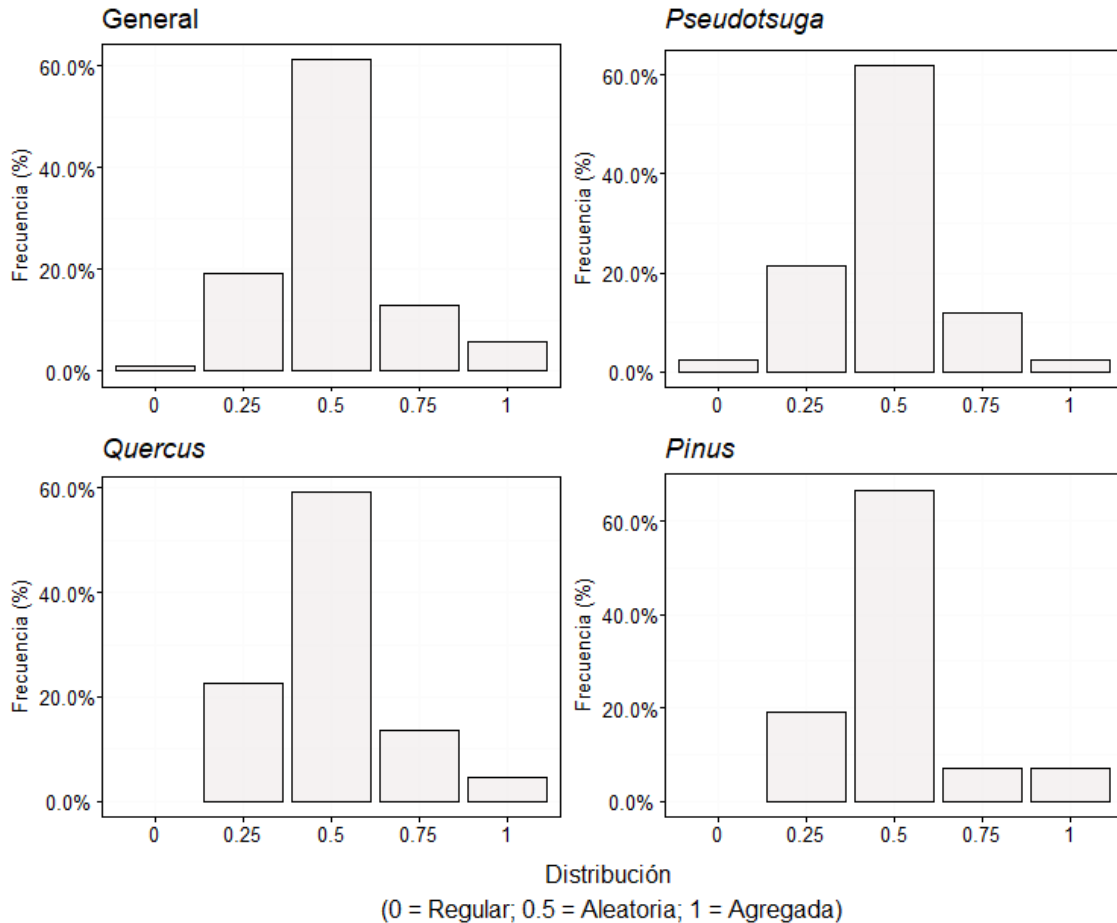


Figura 3. Distribución del índice de uniformidad de ángulos ( $W_i$ ) general y por género: *Pseudotsuga*, *Quercus* y *Pinus*. El grupo general incluye a todos los géneros.

*Índice de mezcla de especies ( $M_i$ )*. Se obtuvo ( $\bar{x} = 0.83$  [0.76-0.89]) para el bosque en general, teniendo el mayor porcentaje en las categorías 0.75 y 1 (Figura 4), lo que indica que la mayoría de los árboles de referencia ( $i$ ) están rodeados por individuos de especies diferentes a él. El análisis por género mostró que *Pseudotsuga* ( $\bar{x} = 0.65$  [0.48-0.83]) suele estar o no mezclada con individuos de cualquier especie y la mayoría de sus individuos se encuentran en la categoría 0.5, *Quercus* ( $\bar{x} = 0.90$  [0.83-0.97]) normalmente aparece mezclado con diferentes especies ya que la mayoría de sus individuos se encuentran en las categorías 0.75 y 1, mientras que *Pinus* ( $\bar{x} = 0.90$  [0.80-0.98]) tiene una ligera

tendencia a estar mezclado con especies diferentes, con la mayor frecuencia en las categorías 0.75 y 1.

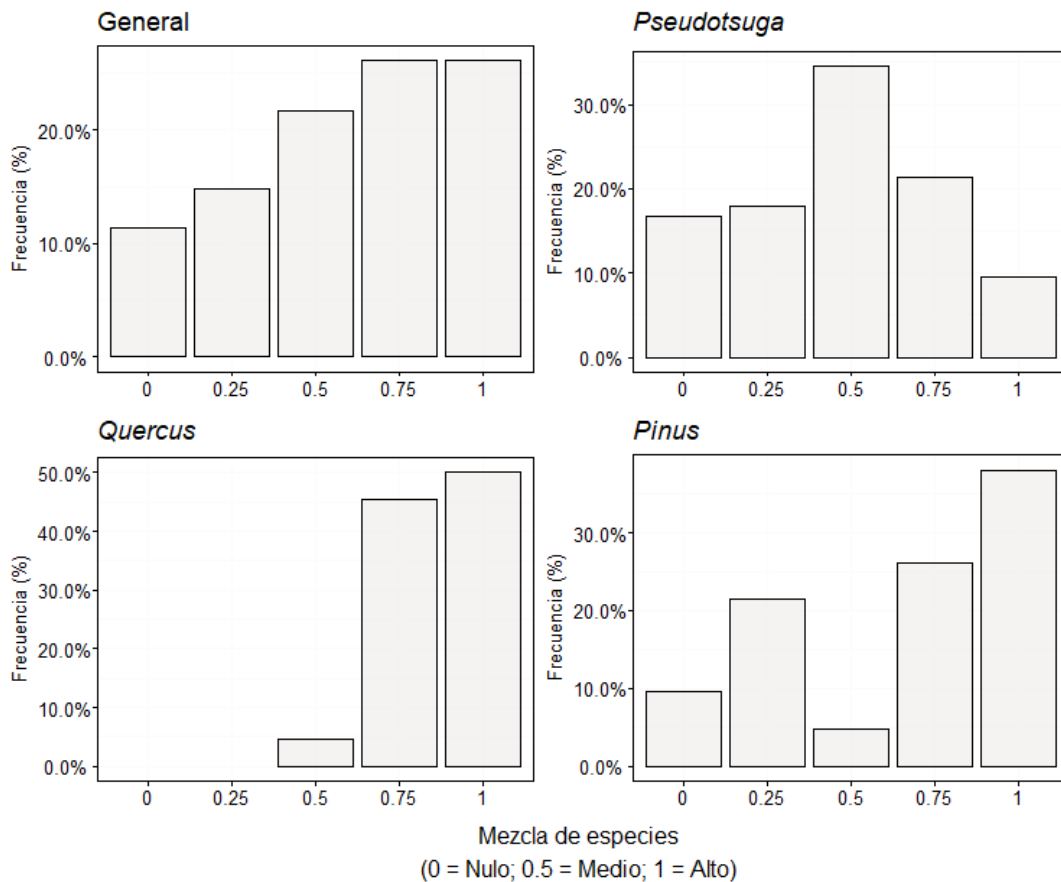


Figura 4. Distribución del índice de mezcla de especies ( $M_i$ ) general y por género.

*Índice de dominancia dimensional diamétrica ( $UD_i$ )*. Las distribuciones de los valores de dominancia relativa no muestran ninguna tendencia en el análisis general del bosque (Figura 5) ( $\bar{x} = 0.53$  [0.45-0.61]); mientras que, al analizarse por género, *Pseudotsuga* ( $\bar{x} = 0.59$  [0.49-0.73]) tiene la mayor proporción individuos en la categoría de 0.75, lo que indica que es una especie que domina sobre las que la rodean. *Quercus* ( $\bar{x} = 0.56$  [0.40-0.75]), de igual manera tiene la mayor frecuencia en la categoría 1, sin embargo, las categorías menores 0 y 0.25 cuentan con alrededor del 45% de los individuos, mostrando así que este género puede tener árboles tanto dominantes como dominados, mientras que *Pinus* ( $\bar{x} = 0.55$  [0.37-0.72]) al contrario tiene la mayoría de las frecuencias en la categoría 0, más del 25%, sin embargo, las categorías 0.75 y 1 suman más del 40%,

indicando que normalmente se encuentra rodeado por árboles más grandes, tanto en diámetro como en altura, pero puede llegar a dominar en algunas ocasiones.

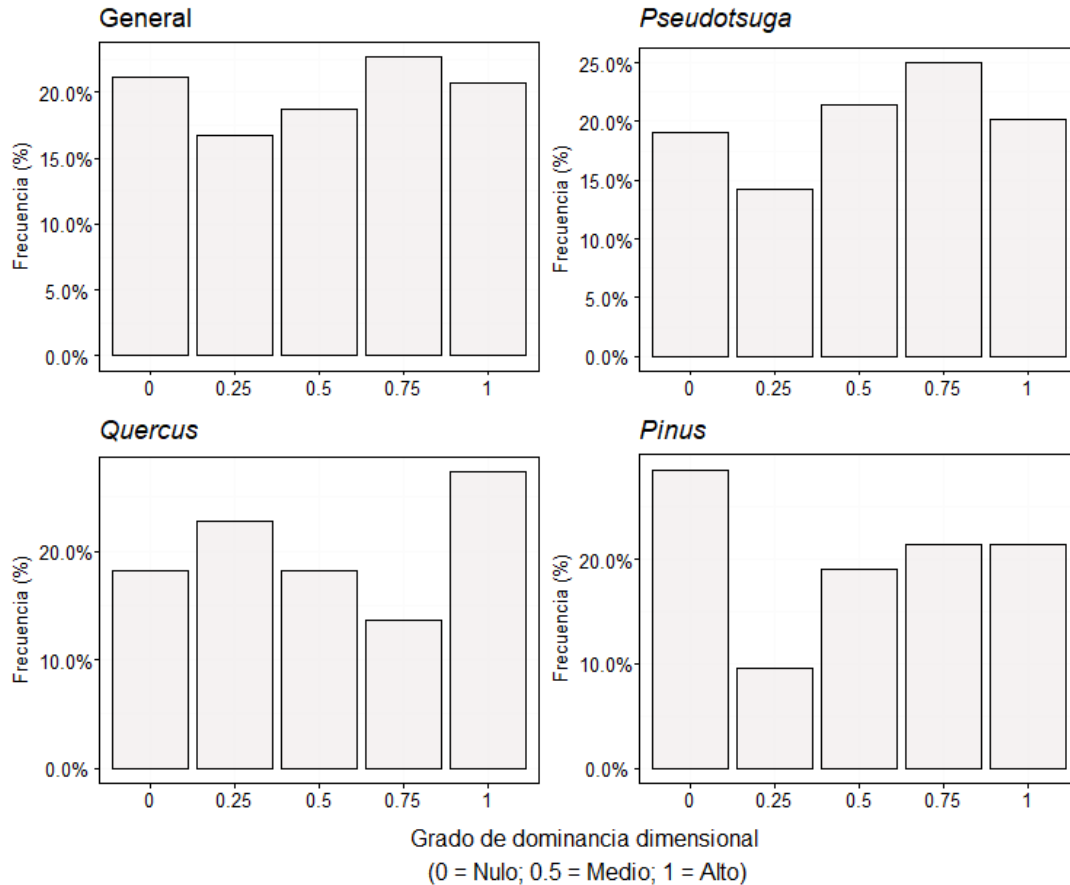


Figura 5. Distribución del índice de dominancia dimensional diamétrica ( $UD_i$ ) general y por género. Índice de dominancia dimensional de altura ( $UH_i$ ). De manera general ( $\bar{x} = 0.51$  [0.43-0.59]) la distribución de dominancia en altura muestra una ligera tendencia a que existen especies dominantes en el área de estudio (Figura 6), eso se corrobora en el análisis por género ya que *Pseudotsuga* ( $\bar{x} = 0.64$  [0.53-0.76]) tiene su mayor frecuencia en las categorías 0.75 y 1, indicando que es una especie dominante en altura. *Quercus* ( $\bar{x} = 0.45$  [0.33-0.58]), tienen las mayores frecuencias en las categorías menores por lo que se encuentran rodeados por

árboles más grandes, *Pinus* ( $\bar{x} = 0.62$  [0.48-0.75]) por su parte tuvo sus mayores frecuencias en la categoría de 0.50 y 0.75, indicando que es una especie codominante.

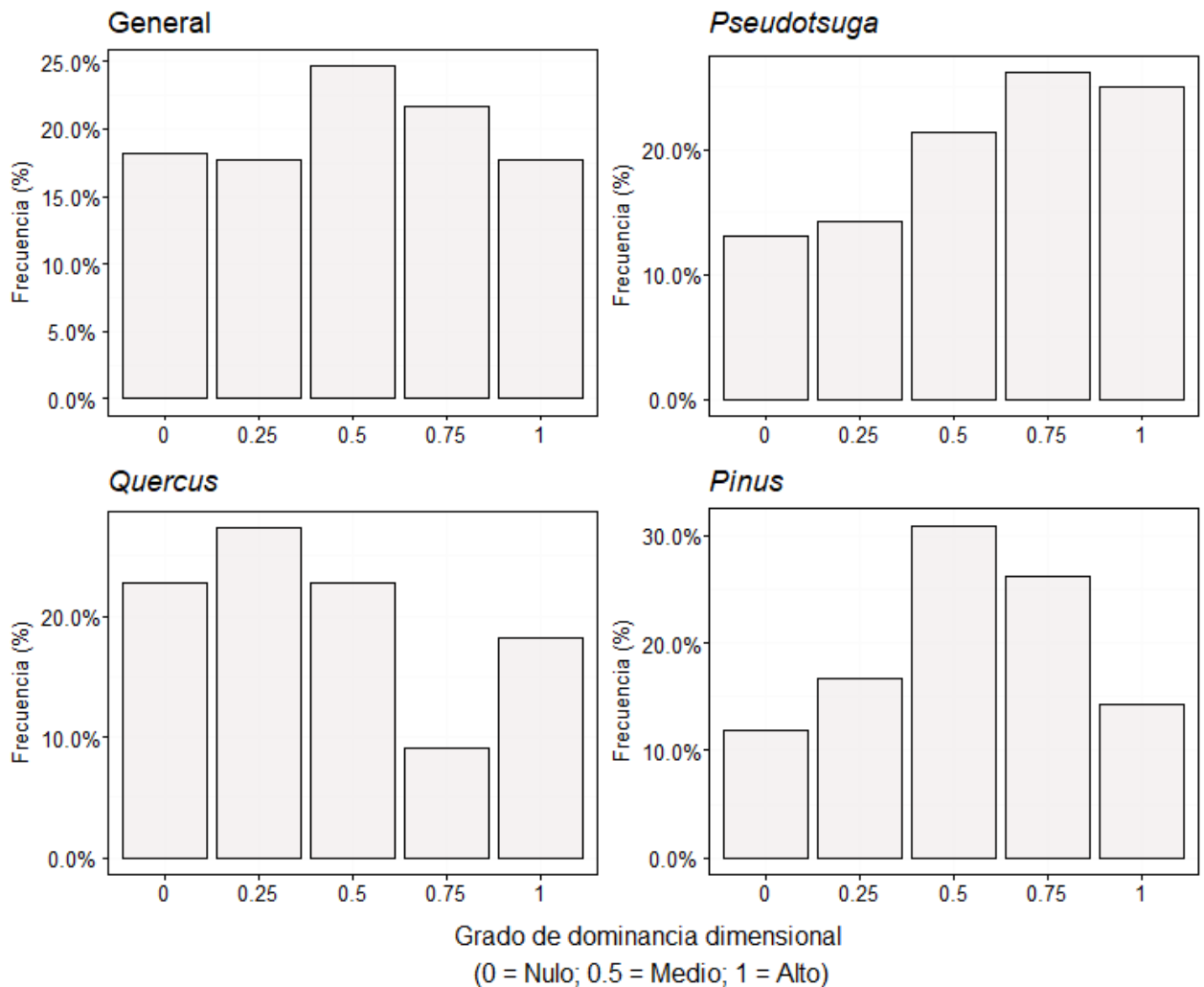


Figura 6. Distribución del índice de dominancia dimensional de altura ( $UH_i$ ) general y por género. *Índice de diferenciación dimensional diamétrica ( $TD_i$ )*. El bosque muestra una diferenciación diamétrica moderada, teniendo alrededor del 60% de frecuencia en esta categoría (Figura 7), seguida de la categoría clara. El análisis por género mostró la misma tendencia (Moderada), excepto *Quercus* quien presento un grado de diferenciación débil. Por otra parte, los valores medios obtenidos

mediante la prueba Bootstrap quedaron dentro del intervalo de confianza para todos los grupos.

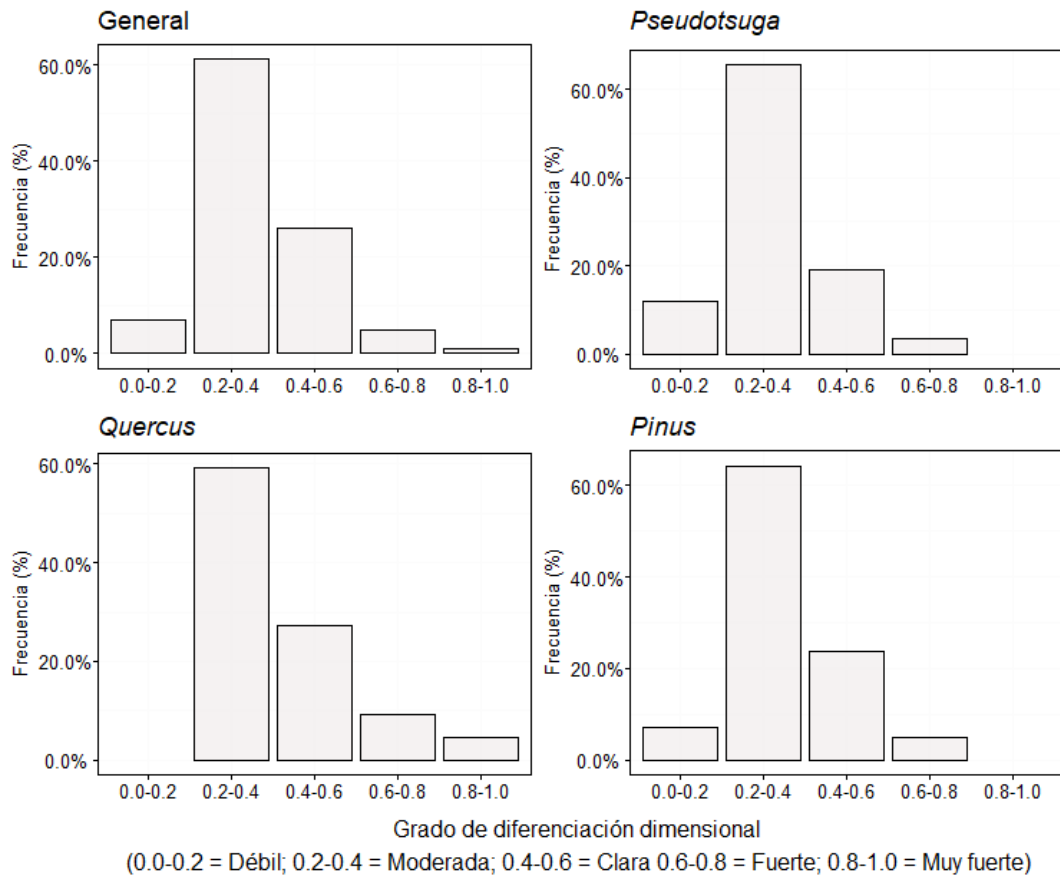


Figura 7. Distribución del índice de diferenciación dimensional diamétrica ( $TD_i$ ) general y por género.

*Índice de diferenciación dimensional de altura ( $TH_i$ )*. Al igual que en la diferenciación diamétrica la distribución de alturas se muestra similar presentando la mayoría de sus frecuencias en la categoría moderada, seguida de la clara (Figura 8). El análisis por género mostró la misma tendencia y los valores medios obtenidos mediante la prueba Bootstrap quedaron dentro del intervalo de confianza para todos los grupos.

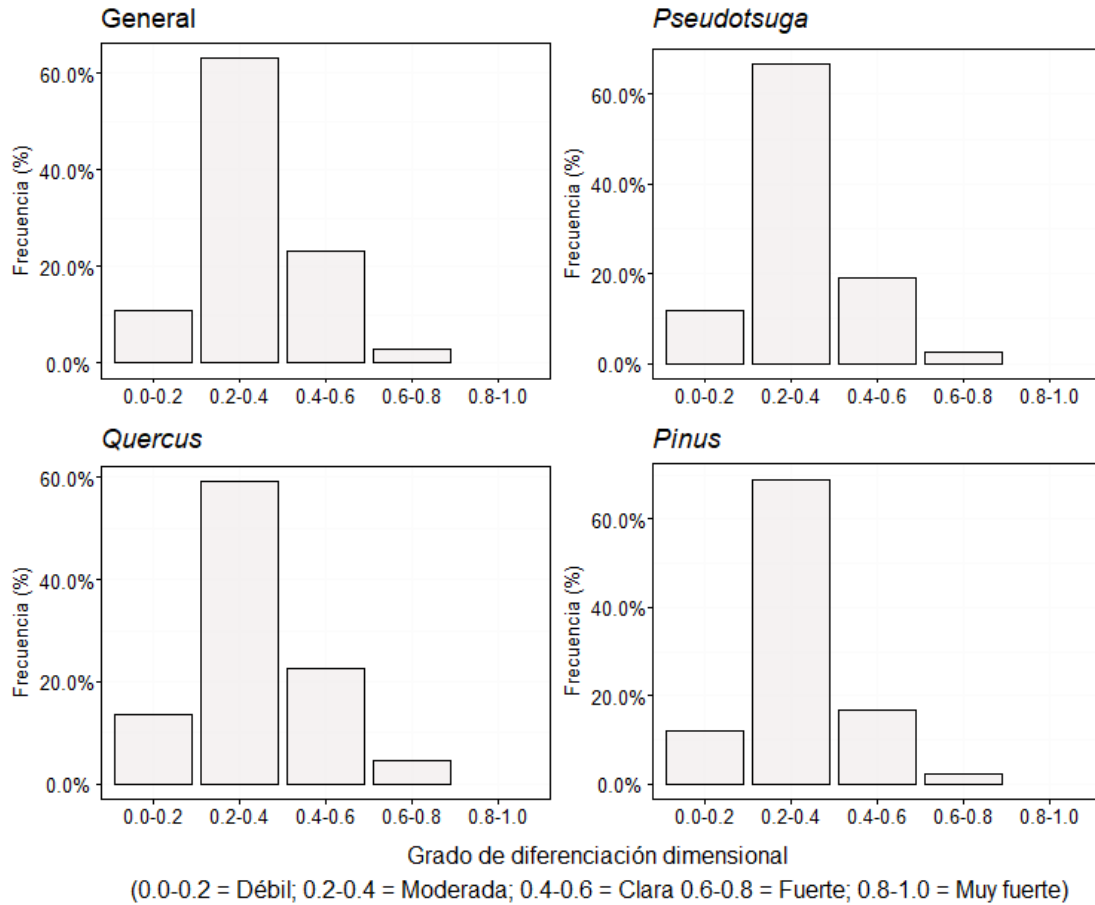


Figura 8. Distribución del índice de diferenciación dimensional de altura ( $TH_i$ ) general y por género.

## Discusión

Respondiendo a las preguntas de investigación planteadas la distribución y mezcla del arbolado fue aleatoria, asimismo el bosque presentó una tendencia a la homogeneidad ya que la diferenciación dimensional fue de moderada a clara. Una de las principales similitudes con otros estudios se reflejó en el índice de Uniformidad ( $W_i$ ) aplicado también en bosques naturales, en bosques bajo manejo y en bosques con antecedentes de incendios (Graciano-Ávila et al., 2020; Rubio-Camacho et al., 2017; Zhang et al., 2019). Mientras que una de las diferencias se presentó en el Índice de mezcla de especies ( $M_i$ ) el cual fue distinto a lo encontrado en bosques de pino – encino y a otras poblaciones de *Pseudotsuga* (Domínguez-Calleros et al., 2014; Rubio-Camacho et al., 2017).

La estructura espacial del bosque es el resultado de dinámicas pasadas e interacciones complejas entre muchos procesos (Moravie y Audrey, 2003). Esta dinámica incluye la heterogeneidad ambiental y la competencia entre individuos y poblaciones (Duncan, 1991; Valverde y Silvertown, 1997). Aguirre et al. (2003) mencionan que este tipo de descripciones son más completas que los enfoques tradicionales.

*Distribución espacial del arbolado.* Los grupos estructurales generados (254 ha<sup>-1</sup>) para este tipo de bosque fueron superiores a los creados por Graciano-Ávila et al., (2019) para una parcela con tratamiento de regeneración (96 ha<sup>-1</sup>) y otra con tratamiento de selección (134 ha<sup>-1</sup>) para un bosque de pino - encino, mientras que Rubio-Camacho et al., (2017) generó 243 ha<sup>-1</sup> grupos para una zona con evidencias de incendio y 281 ha<sup>-1</sup> para una sin evidencias de incendios en un bosque pino-encino. La mayoría de las especies arbóreas en los bosques de todo el mundo se agregan espacialmente a diferentes escalas y los patrones espaciales de los árboles cambian con la etapa de desarrollo del bosque, particularmente en los bosques naturales no muy perturbados por acción antropogénica (Codit, 2000; Getzin et al., 2008; Yang et al., 2018).

*Índice de uniformidad de ángulos (Wi).* Evidenció una distribución aleatoria del bosque. Resultados similares a los reportados por Zhang et al., (2019), quienes evaluaron bosques naturales en diferentes regiones de China encontrando que los bosques de *Picea schrenkiana*, de *Pinus koraiensis* y un bosque mixto de pino – roble. Rubio-Camacho et al., (2017) registró también esta distribución en bosques regenerados después de los incendios forestales. Mientras que Graciano-Ávila et al., (2020) lo documentó para bosques bajo aprovechamiento forestal.

Los resultados de *Quercus* y *Pinus* no presentaron diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ) contra estudios en bosques similares (Rubio-Camacho et al., 2017), ya que sus valores están entre 0.47 y 0.50 quedando dentro de nuestro intervalo de confianza (IC) del 95., *Pseudotsuga* por su parte no presentó diferencias con los valores reportados (S1: 0,509 y S2: 0,532) por Domínguez-Calleros et al., (2014).

*Índice de mezcla de especies (Mi)*. De manera general indica que los árboles referencia (*i*) están rodeados por individuos de especies diferentes a él. El análisis por género revela que *Pseudotsuga* no muestra preferencia por estar o no mezclado, contrario a lo publicado por Domínguez-Calleros et al., (2014), quienes reportaron una mezcla alta para dos poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* en la reserva de la biosfera “La Michilía” en los estados de Durango y Zacatecas. *Quercus* y *Pinus* muestran un mayor grado de mezcla en este estudio que en bosques de pino – encino (Rubio-Camacho et al., 2017).

Los resultados generales para mezcla de especies presentaron diferencias significativas comparado con lo mencionado por Rubio-Camacho et al., (2017), ya que sus valores medios fueron P1: 0.57 y P2: 0.58. Lo anterior se corrobora en el análisis por género ya que los mismos reportan valores de P1: 0.49 y P2: 0.56 para *Pinus* y *Quercus* respectivamente quedando fuera del IC calculado (*Pinus*: 0.83-0.97, *Quercus*: 0.80-0.98). *Pseudotsuga* de igual manera presentó diferencias estadísticamente significativas ( $p \geq 0.05$ ) con lo reportado (S1: 0,732 y S2: 0,665) por (Domínguez-Calleros et al., 2014).

*Índice de dominancia dimensional diamétrica (UDi)*. No mostró ninguna tendencia para el bosque en general. Estos resultados al igual que los de Graciano-Ávila et al., (2019) y Rubio-Camacho et al., (2017) determinan que el bosque es heterogéneo en este aspecto, sin embargo, el análisis por género muestra que *Pseudotsuga* es dominante sobre las demás especies ya que este género es de los más abundantes y de mayores dimensiones (Diámetro normal, cobertura de copa) en el área de estudio (García et al., 2019). *Quercus* mostró una alta dominancia sobre las demás especies, aunque tiene un gran porcentaje en las categorías menores, *Pinus* por su parte se comportó como especie dominada contrario a lo reportado por Rubio-Camacho et al. (2017).

*Índice de dominancia dimensional de altura (UHi)*. Manifestó que *Pseudotsuga* es el género dominante en el área de estudio lo cual se entiende ya que, de acuerdo con García et al., (2019) sus individuos son abundantes y de alturas máximas de hasta 26.30 m. Al igual que en el estudio de Rubio-Camacho et al., (2017) *Quercus* es dominado por los demás géneros, mientras que *Pinus* es

codominante según la clasificación de Gadow et al. (2007). Los resultados generales mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) contra la parcela 1 estudiada por Rubio-Camacho et al. (2017) donde obtuvo una media de 0.35, mientras que para la parcela 2 no existieron diferencias donde el valor fue de 0.45 encontrándose dentro del IC (0.43-0.59).

*Índice de diferenciación dimensional diamétrica y en altura ( $TD_i$  y  $TH_i$ ).* El grado de diferenciación dimensional tanto en diámetros como en alturas fue moderado, similar a lo encontrado por Rubio-Camacho et al., (2017) y Graciano-Ávila et al., (2019) en bosques de pino – encino. Esto indica que existe escasa variabilidad en las dimensiones del arbolado y que la estructura, tanto horizontal como vertical es poco heterogénea.

Los resultados indican que la uniformidad ( $W_i$ ), en este caso aleatoria, no es exclusiva de bosques sin disturbio o sin manejo, además se observa que la mezcla de especies ( $M_i$ ) no necesariamente es mayor en bosques maduros y sin intervención como en este caso. Por su parte la dominancia diamétrica ( $UD_i$ ) mostró que géneros como *Pinus* pueden llegar a ser dominados por otros, así como la dominancia en altura ( $UH_i$ ) corrobora que géneros como *Quercus* suelen ser dominados. Por su parte la diferenciación dimensional muestra tanto en el bosque estudiado como en otros tipos de bosques está es homogénea.

Lo obtenido en esta investigación deja en claro que existe una necesidad de generar información de la estructura y dinámica espacial, de este tipo de ecosistemas ya que es escasa. La aplicación de los índices aquí empleados contribuye de manera importante al entendimiento de los procesos que se llevan a cabo en un bosque para llegar a generar una estructura. Lo anterior da bases para el manejo y conservación de comunidades vulnerables como la aquí estudiada, teniendo conocimiento de manera más individualizada de la dinámica a nivel especie o género.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados permitieron observar que las familias de mayor relevancia en el bosque son Pinaceae y Fagaceae; la riqueza y diversidad de especies fue ligeramente mayor a la de otros estudios en bosques templados. La comunidad estudiada cuenta regeneración natural de la mayoría de sus especies a pesar de contar con arbolado de grandes dimensiones que provocan un dosel cerrado; *Pinus durangensis* y *Arbutus xalapensis* no la presentan, lo que puede atribuirse a la escasez de individuos maduros. La mayoría de ellos se presentaron en el estrato III, lo que sugiere que el bosque tiene una alta capacidad de recuperación y sustitución de arbolado maduro, encontrándose en proceso de regeneración ya que la mayoría de sus individuos se encuentran en las clases diamétricas menores; también, se puede ver que la estructura diamétrica se encuentra balanceada con presencia de individuos en casi todas sus clases diamétricas (Excepto CD 85) que conlleva a la conservación del ecosistema.

Con base en la abundancia y los estratos de estructura vertical definidos, el bosque es una comunidad dominada principalmente por *Pseudotsuga menziesii* en todos los estratos del arbolado, el estrato I con menor presencia de *Abies durangensis* y *Quercus tuberculata*, mientras que en el II y III presenta asociaciones con *P. arizonica*, *Q. tuberculata* y *A. xalapensis*. Se registraron tres especies con distribución vertical continua (*P. menziesii*, *A. durangensis* y *Q. tuberculata*), siendo estas las que dominan el dosel superior.

De igual manera en la estructura horizontal *Pseudotsuga menziesii*, *Quercus tuberculata* y *Pinus arizonica* fueron las especies con mayor valor de importancia en el bosque, asimismo presentaron los mayores valores de volumen, biomasa y contenido de carbono, este último fue de 45.29 Mg C ha<sup>-1</sup>.

Al evaluarse los patrones de distribución espacial se reflejó una distribución aleatoria de acuerdo con el índice ( $W_i$ ), mientras que el grado de mezcla ( $M_i$ ) manifestó que la especie referencia cuenta con más de 2 vecinos de diferente especie, no se registró una dominancia clara de diámetros y alturas de manera general ya que ( $UD_i$ ) y ( $UH_i$ ) mostraron valores similares en cada uno de los

grados de dominancia, la diferenciación dimensional ( $TD_i$ ) y ( $TH_i$ ) fue moderada, dando a notar que existe poca variación en las dimensiones del arbolado, similar a estudios en bosques perturbados y bajo manejo.

El estudio de nuevas poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* como esta, aporta información cuantitativa y precisa de las relaciones entre especies de manera más auténtica y puede ser base para la conservación de estas o futuras restauraciones en áreas perturbadas, así como también aporta en la generación de conocimiento del estado actual de especies endémicas y en protección como *Abies durangensis* y *Picea chihuahuana*. En el caso de la presente área de estudio se concluye que posee un buen estado de conservación ya que es evidente la presencia de individuos de porte bajo que posteriormente sustituirán a la masa madura, a excepción de *Picea Chihuahuana* quien presento valores bajos.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguirre C., O. A. (2002). Índices para la caracterización de la estructura del estrato arbóreo de ecosistemas forestales. *Ciencia Forestal en México* 27(92): 5-27.

Aguirre, O., Hui, G., von Gadow, K., & Jiménez, J. (2003). An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management*, 183(1-3): 137-145. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00102-6)

Aguirre, O., Kramer, H., & Jiménez, J. (1998). Strukturuntersuchungen in einem kiefern-durchforstungsversuch nordmexikos. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 169 (12): 213-219.

Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y bosques*, 21: 17-28. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210423>

Alanís, E., J. Jiménez, A. Valdecantos D., M. Pando M., O. Aguirre C. y E. J. Treviño G. (2011). Caracterización de regeneración leñosa post-incendio de un ecosistema templado del Parque Ecológico Chipinque, México. *Revista Chapingo, Serie: Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(1): 31-39, <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.032>

Albert, M. (1999). *Analyse der eingriffsbedingten Strukturveränderung und Durchforstungsmodellierung in Mischbeständen*. [Tesis doctoral. Faculty of Forest Sciences, University Göttingen].

Álvarez, F. A. D., Hernández, J. J. V., Upton, J. L., Vallejo, P. R., & Nolazco, E. G. (2004). Aspectos ecológicos de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido La Barranca, Pinal de Amoles, Querétaro. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 75(2): 191-203. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40075202>

Alvis, J. (2009). Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayán. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 7(1): 115-122. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n1/v7n1a13.pdf>

Aragón-Piña, E. E., A. Garza-Herrera, M. S. González-Elizondo y I. Luna-Vega. (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. <http://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2010.003.648>

Arruda, M., Brandão, D., Costa, F., Tolentino, G., Brasil, R., Neto, S., & Nunes, R. (2011). Structural aspects and floristic similarity among tropical dry forest fragments with different management histories in Northern Minas Gerais, Brazil. *Revista Árvore*, 35(1): 131-142. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000100016>

Ávila-Akerberg, V. (2010). *Forest quality in the southwest of Mexico City: Assessment towards ecological restoration of ecosystem services*. Freiburg, Br:

Institut für Landespflege.  
<https://www.claraboya.com.mx/storage/app/media/docpub/magdalena/tesis/TesisAvilaAkerberg2009.pdf>

Ávila-Flores, D. Y., González, T. M. A., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., Treviño, G. E. J., Vargas, L. B., et al. (2014). Efecto de la severidad del fuego en las características de la estructura forestal en rodales de coníferas. *Revista Chapingo Series Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20: 33–45.  
<http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.01.005>

Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320 (5882): 1444-1449.  
<https://doi.org/10.1126/science.1155121>.

Camacho, R., E. Alonso, M. A. González T., J. Jiménez P., E. Alanís R., D. y F. Ávila (2014). Diversidad y distribución vertical de especies vegetales mediante el índice de Pretzsch. *Ciencia UANL*, 17(65): 34-41.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2000, 30 de noviembre) Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). Capítulo II, artículo 130 del Reglamento de la LGEEPA en materia de las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación. Diario Oficial de la Federación [DOF]. (1988).  
[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg\\_LGEEPA\\_ANP.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_ANP.pdf)

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2002, 30 de marzo) NOM-059-ECOL-2001. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestre-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2002).  
[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg\\_LGEEPA\\_ANP.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_ANP.pdf)

Canizales, P. A., E. Alanís, R. Aranda, J. M. Mata, J. Jiménez, E. Alanís, J. I. Uvalle y M. G. Ruiz. (2009). Caracterización estructural del matorral submontano

de la Sierra Madre Oriental, Nuevo León, México. *Revista Chapingo, Serie: Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(2):115-120.

Castellanos, B. J. F., Treviño, G. E. J., Aguirre, C. O. A., Jiménez, P. J. y Velázquez, V. M. A. (2010). Diversidad arbórea y estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1: 39–52. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1421212>

Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M. y 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.

Castruita-Esparza, L. U., Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Ramírez-Guzmán, M. E., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2016). Basal area increment series of dominant trees of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco show periodicity according to global climate patterns. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3): 379-397. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.10.048>

Challenger, A. (1998). Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado presente y futuro (No. 581.5 C44Y). <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000023389>

Change, I. P. O. C. (2006). IPCC *guidelines for national greenhouse gas inventories*. 2013-04-28]. [https://www.ipcc-tfi.iges.or.jp/meeting/pdfiles/Washington\\_Report.pdf](https://www.ipcc-tfi.iges.or.jp/meeting/pdfiles/Washington_Report.pdf)

Chaves, C. G. C., & Rodríguez, S. A. E. (2012). Estructura y composición florística del bosque ribereño subandino de la subcuenca de Yumbillo, Yumbo (Valle del Cauca). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(1): 63-66. <https://doi.org/0.22490/21456453.933>

Chávez, N. (2009). Estudio regional forestal de la Unidad De Manejo Forestal No. 0808 Guadalupe Y Calvo, Chihuahua". Asociación Regional de Silvicultores de Guadalupe y Calvo A.C. [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/9/1147ERF\\_UMAFOR0808.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/9/1147ERF_UMAFOR0808.pdf)

Comisión Nacional Forestal [Conafor]. (2012). Inventario nacional forestal y de suelo. Informe 2004 -2009. [www.ccmss.org.mx/Inventario\\_nacional\\_forestal\\_y\\_de\\_suelos\\_informe\\_2004\\_-\\_2009\\_.pdf](http://www.ccmss.org.mx/Inventario_nacional_forestal_y_de_suelos_informe_2004_-_2009_.pdf)

Condit, R., Ashton, P. S., Baker, P., Bunyavejchewin, S., Gunatilleke, S., Gunatilleke, N., & Lee, H. S. (2000). Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science*, 288 (5470): 1414-1418.

Corral, J., Aguirre, O. A., Jiménez, J. y Corral, S. (2005). Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el Bosque Mesófilo de Montaña "El Cielo", Tamaulipas, México. *Investigaciones Agrarias: Sistema de Recursos Forestales*, 14(2): 217–228.

Corral, J., O. Aguirre, J. Jiménez. y S. Corral. (2005). Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el Bosque Mesófilo de Montaña "El Cielo", Tamaulipas, México. *Investigaciones Agrarias: Sistema de Recursos Forestales*, 14: 217-228. <https://185.79.129.77/index.php/IA/article/view/2278>

Dávila-Lara, M. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jurado-Ybarra, E., Treviño-Garza, E., González-Tagle, M. A., & Trincado, G. (2019). Estructura y diversidad de especies arbóreas en bosques templados de San Luis Potosí, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 6(18): 399-409. <http://dx.doi.org/10.19136/era.a6n18.2112>

De la Paz P.O., C. 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.  
<https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431206>

Debreczy, Z., & Rácz, I. (1995). New species and varieties of conifers from Mexico. *Phytologia*, 78(4): 217-243.

Degraaf, R. M., J. B. Hestbeck and M. Yamasaki, (1998). Associations between breeding bird abundance and stand structure in the White Mountains, New Hampshire and Maine, USA. *Forest Ecology and Management*, 103(2-3): 217-233. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00213-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00213-2)

Del Río, M., F. Montes, G. Montero. e I. Cañellas. (2003). Revisión: índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigaciones Agrarias: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(1): 159–176.

Delgado, Z. D. A., S. A. Heynes S., M. D. Mares Q., M. L. Piedra L., F. I. Retana R., K. Rodríguez C., A. I. Villanueva H., M. S. González E y L. Ruacho G. (2016). Diversidad y estructura arbórea de dos rodales en Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(33): 94-107.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf>

Domínguez Á., F. A., J. J. Vargas H., J. López U., P. Ramírez V. y E. Guízar N. (2004). Aspectos ecológicos de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido La Barranca, Pinal de Amoles, Querétaro. *Anales del Instituto de Biología, UNAM, Serie Botánica*, 75: 191-203.

Domínguez-Calleros, P. A., G. A. Chávez-Flores, E. Rodríguez-Téllez, J. J. Corral-Rivas, J. R. Goche-Telles y M. A. Díaz-Vásquez. (2014). Caracterización silvícola de *Pseudotsuga menziesii* en la reserva de la biosfera "La Michilía". *Madera y Bosques*, 20(2): 23-31. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.202161>

Du, H., Hu, F., Zeng, F., Wang, K., Peng, W., Zhang, H., ... & Song, T. (2017). Spatial distribution of tree species in evergreen-deciduous broadleaf karst forests in southwest China. *Scientific reports*, 7(1): 1-9.

Duncan, R. P. (1991). Competition and the coexistence of species in a mixed podocarp stand. *The Journal of Ecology and Management*, 256(1-2): 161-167. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.021>.

Encina-Domínguez, J. A., F. J. Encina-Domínguez, E. Mata-Rocha y J. Valdés-Reyna. (2008). Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la Sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 83: 13-24. <https://doi.org/10.17129/botsci.1785>

Farjon, A. 2013. *Abies durangensis*. La Lista Roja de la UICN de Especies Amenazadas 2013. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42279A2969264.en> .

Flores, G. A. C., Rivas, J. J. C., Nieva, J. D. V., Serrano, P. M. L., & Camacho, E. A. R. (2020). Estructura espacial de los bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.614>

Fowells, H. A. (1965). Silvics of forest trees of the United States. Agriculture Handbook 450. USDA Forest Service. Washington, DC, USA. pp: 674-683.

Fülder, K. (1995). Zur Strukturbeschreibung in Mischbeständen. *Forstarchiv*, 66: 149–161.

Gadow K. V., G. Hui und M. Albert (1998) Das Winkelmaß – ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Waldbeständen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 115:1-9.

Gadow K. V., P. Real y J. G. Álvarez (2001) Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. *IUFRO World Series* 12:242.

Gadow K. V., S. Sánchez y J. G. Álvarez (2007) Estructura y Crecimiento del Bosque. Universidad de Göttingen, Alemania. 141 p.

Galván-Moreno, R. (2016). *Manual para la identificación de Altos Valores de Conservación en bosques templados de México. La experiencia del suroeste del estado de Chihuahua*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Comisión Nacional Forestal. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/185985/Manual\\_para\\_la\\_identificacion\\_de\\_Altos\\_Valores\\_de\\_Conservacion\\_en\\_bosques\\_templados\\_de\\_Mexico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/185985/Manual_para_la_identificacion_de_Altos_Valores_de_Conservacion_en_bosques_templados_de_Mexico.pdf)

García Campusano, F., Monjarás González, G., Galindo Flores, G., Ponce Mendoza, A., Chávez Ávila, V. M., & Márquez Guzmán, J. (2019). Morfogénesis in vitro de brotes adventicios del pinabete mexicano *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 10(56): 113-135. <http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.545>

García García, S. A., Narváez Flores, R., Olivas García, J. M., & Hernández Salas, J. (2019). Diversidad y estructura vertical del bosque de pino-encino en Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10 (53): 41-63. <http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.173>

García Y., L. Olivares y J. Ramos. (2013). Estructura y composición arbórea de un fragmento de bosque mesófilo de montaña en el estado de Veracruz. *Revista Chapingo Serie Ciencia Forestal y del Ambiente* 19: 91-101. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.025>.

García, A.A. y M.S. González E. (1998). Pináceas de Durango. Instituto de Ecología A. C. 179 pp. [http://biblioteca.uaaan.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=33760&shelfbrowse\\_itemnumber=61108](http://biblioteca.uaaan.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=33760&shelfbrowse_itemnumber=61108)

García-Aranda, M. A., Estrada-Castillón, A. E., Cantú-Ayala, C. M. y Pando Moreno, M. (2011). Clasificación de nueve sitios de bosque mixto de coníferas con presencia de *Taxus globosa* en la Sierra Madre Oriental, Nuevo León y Tamaulipas, México. *Botanical Sciences*. 90 (1): 53-62. <https://doi.org/10.17129/botsci.385>

Getzin, S., Wiegand, T., Wiegand, K., & He, F. (2008). Heterogeneity influences spatial patterns and demographics in forest stands. *Journal of Ecology*, 96(4): 807-820.

González, C. R., E. Treviño G., Á. Duque M., T. M. González, M. Gómez C. y A. Bautista C. (2018). Diversidad y estructura arbórea en un bosque de *Abies vejarii* Martínez en el sur del estado de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.142>

González, C. R., Treviño-Garza, E., Duque-Montoya, Á., González-Tagle, M., Gómez-Cárdenas, M., & Bautista-Cruz, A. (2018). Diversidad y estructura arbórea en un bosque de *Abies vejarii* Martínez en el sur del estado de Nuevo León. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*. 9(45). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.142>

González-Tagle, M. A., Schwendenmann, L., Pérez, J. J., & Schulz, R. (2008). Forest structure and woody plant species composition along a fire chronosequence in mixed pine–oak forest in the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico. *Forest Ecology and Management*, 256 (1-2): 161-167. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.021>

Gordon, A.G., (1968). Ecology of *Picea chihuahuana* Martínez. *Ecology*, 49:880-896. <https://doi.org/10.2307/1936540>.

Graciano Á., G., E. Alanís R., O. A. Aguirre C., M. A. González T., E. J. Treviño G. y A. Mora O. (2017). Caracterización estructural del arbolado en un ejido forestal del noroeste de México. *Madera y Bosques*, 23(3): 137-146. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331480>.

Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, Ó. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., & Mora-Olivo, A. (2019). Composición y estructura del estrato arbóreo bajo diferentes tratamientos silvícolas en un ecosistema forestal de la sierra madre occidental (México). [Tesis Doctoral.

Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León].  
<http://eprints.uanl.mx/18435/1/1080289179.pdf>

Guerra De la Cruz, V., López-Domínguez, J. C., López Upton, J., Bautista Sampayo, C., & Hernández García, L. (2012). Estructura silvícola de poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Tlaxcala y Puebla. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3 (13): 73-86. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.490>

Gutiérrez-Báez, C., Ortiz-Díaz, J. J., Flores-Guido, J. S., & Zamora-Crescencio, P. (2012). Diversidad, estructura y composición de las especies leñosas de la selva mediana subcaducifolia del Punto de Unión Territorial (PUT) de Yucatán, México. *Polibotánica*, (33), 151-174.

Hardiman, B.S., Bohrer, G., Gough, C.M., Vogel, C.S., Curtis, P.S. (2011). The role of canopy structural complexity in wood net primary production of a maturing northern deciduous forest. *Ecology*, 92: 1818–1827. <https://doi.org/10.1890/10-2192.1>

Herman, R. H and D. P. Lavender. (1999). Douglas-fir planted forests. *New Forest*, 17: 53-70. <https://doi.org/10.1023/A:1006581028080>.

Hermann, R. K. (1985). The Genus *Pseudotsuga*: Ancestral history and past distribution.

Hernández-Salas, J., O. A. Aguirre-Calderón, E. Alanís-Rodríguez, J. Jiménez-Pérez, E. J. Treviño-Garza, M. A. González-Tagle, C. Luján-Álvarez, J. M. Olivas-García y A. Domínguez- Pereda. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo. Serie: Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2):189-200. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.08.052>.

Hernández-Stefanoni, J. L., Dupuy, J. M., Tun-Dzul, F. & May-Pat, F. (2011). Influence of landscape structure and stand age on species density and biomass

of a tropical dry forest across spatial scales. *Landscape Ecology*, 26:355-370.  
<https://doi.org/10.1007/s10980-010-9561-3>

Hui, G. Y. y Hu, Y. B. (2001). Measuring species spatial segregation in mixed forest. *Forest Research*, 14: 23–27.

Jiménez, J., O. Aguirre and H. Kramer. (2001). Análisis de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México. *Forest Systems*, 10(2): 355-366.

Jiménez, P. J., Aguirre, O. A. C. y Kramer, H. (1998). Bestandestrukturanalyse im ungleichaltrigen Kiefern-Wacholder- Eichen-Mischwald Nordostenmexikos. *Forstarchiv*, 69: 227–234.

Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos* 113: 363–375.  
<https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x>.

Kulik, N. C. P., de Molas, L. P., & Rodríguez, S. M. A. (2019). Análisis estructural de un bosque de la Ecorregión Alto Paraná, Paraguay. *Investigación Agraria*, 20 (2): 127-135. <http://dx.doi.org/10.18004/investig.agrar.2018.diciembre.127-135>.

Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido* (No. 634.95 L239s esp.). GTZ.

Lin, H. T., Lam, T. Y., von Gadow, K., & Kershaw Jr, J. A. (2020). Effects of nested plot designs on assessing stand attributes, species diversity, and spatial forest structures. *Forest Ecology and Management*, 457, 117658.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117658>

López-Hernández, J.A., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Monárrez-Gonzalez, J. C., González-Tagle, M. A. y Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1): 39-51. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311518>

Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing Company. Cambridge, MA, USA. 256 p.  
[https://www2.ib.unicamp.br/profs/thomas/NE002\\_2011/maio10/Magurran%202004%20c2-4.pdf](https://www2.ib.unicamp.br/profs/thomas/NE002_2011/maio10/Magurran%202004%20c2-4.pdf)

Mair, P., Wilcox, R. y Schoenbrodt, F. (2015). *WRS2: a collection of robust statistical methods*.

Mápula-Larreta, M., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., & Hernández-Livera, A. (2007). Reproductive indicators in natural populations of Douglas-fir in Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 16(3): 727-742.  
<https://doi.org/10.1007/s10531-005-5821-y>

Mápula-Larreta, M., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J., & Hernández-Livera, A. (2008). Germinación y vigor de semillas en *Pseudotsuga menziesii* de México. *Ra Ximhai*, 4(1): 119-134.

Margalef, R. (1972). Homage to E. Hutchison, or why is there an upper limit to diversity. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 44: 211-235. <http://hdl.handle.net/10261/166281>

Martínez, B. R. A., Aguirre-Calderón, O. A., Vargas-Larreta, B., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yamallel, J. I. (2016). Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35): 91-105. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i35.77>

Melo, O. (2019). Estructura de fragmentos de bosque seco tropical en el sur del departamento del Tolima, Colombia. Boletín Científico. Centro de Museos. *Museo de Historia Natural*, 23 (1): 31-51. <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.1.2>

Mena-Mosquera, V., Andrade C., H., & Torres-Torres, J. (2019). Composición florística, estructura y diversidad del bosque pluvial tropical de la subcuenca del río Munguidó, Quibdó, Chocó, Colombia. *Entramado*, 16(1): 204-215. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.6109>

Méndez, C., E. Alanís, J. Jiménez, O. A. Aguirre y E. J. Treviño. (2014). Análisis de la regeneración postincendio en un bosque de pino-encino de la Sierra de Guerrero, México. *Ciencia UANL*, 17(69):63-70.

Monserud, R. A., & Marshall, J. D. 2001. Time-series analysis of  $\delta^{13}\text{C}$  from tree rings. Time trends and autocorrelation. *Tree Physiology*, 21: 1087-1102. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.15.1087>

Mora, C. A., E. Alanís, J. Jiménez, M. A. González, J. I. Yerena y L. G. Cuellar. (2013). Estructura, composición florística y diversidad del matorral espinoso tamaulipeco, México. *Ecología Aplicada*, 12(1):29-34.

Moravie, MA y Robert, A. (2003). Un modelo para evaluar las relaciones entre la dinámica forestal y la estructura espacial. *Journal of Vegetation Science*, 14 (6): 823-834.

Mori, A., Mizumachi, E., Osono, T., Doi, Y. (2004). Substrate-associated seedling recruitment and establishment of major conifer species in an old-growth subalpine forest in central Schwendtner, O. & Muñoz, P. (2005). La selvicultura hacia bosques maduros, herramienta para la conservación de la Biodiversidad en los hayedos de Navarra. Actas del IV Congreso Forestal Nacional, Zaragoza. Soc. Esp. de Ciencias Forestales. Ni R., Y. Baiketuerhan, C. Zhang, C., X. Zhao and K. V. Gadow (2014) Analysing structural diversity in two temperate forests in northeastern China. *Forest Ecology and Management*. 316: 139-147.

Murdoch, W. W., Evans, F. C., & Peterson, C. H. (1972). Diversity and pattern in plants and insects. *Ecology*, 53 (5): 819-829.

Najera, L, J. A.; Garcia, R, P. (2009). Propiedades Físicas de la madera de *Juniperus deppeana* y *Arbustus xalapensis* de la región del Salto Durango. *TecnoINTELECTO*, 6(1): 37–41. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.083>

Návar, C. J. J. y González, E. S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, 27: 71-87. <https://www.polibotanica.mx/ojs/index.php/polibotanica/article/view/785>

Newton, A. C. y V. Kapos. (2002). Indicadores de la biodiversidad en los inventarios forestales nacionales. *Unasylva*, 53: 56–75.

Ogawa, H., Yoda, K., Ogino, K. & Kira, T., (1965). Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand II Plant biomass. *Nature and Life Southeast Asia*, 4: 49-80

Ordóñez Díaz, J. A. B., Galicia Naranjo, A., Venegas Mancera, N. J., Hernández Tejeda, T., Ordóñez Díaz, M. D. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y bosques*, 21: 77-216. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>

Ordóñez, J. A. B., de Jong, B. H., García-Oliva, F., Aviña, F. L., Pérez, J. V., Guerrero, G. & Masera, O. (2008). Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, México. *Forest Ecology and Management*, 255(7): 2074-2084. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.024>

Ortega, A, E. J. (2017). Generación de un modelo de regresión segmentado a través de un análisis dendroclimático en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. [Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/16480/>

Owston, P. W. and W. I. Stein. (1974). *Pseudotsuga Carr. Douglas-Fir*. In: *Sociometer, C. S. (ed.) Seeds of the woody plants in United States*. Agricultural Handbook 450. USDA Forest Service. Washington, DC, USA. pp: 674-683.

Pommerening, A. y Stoyan, D. (2006). Necesidades de corrección de bordes en la estimación de índices de estructura forestal espacial. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(7): 1723-1739. <https://doi.org/10.1139/x06-060>

Pommerening, A., Wang, H. y Zhao, Z. (2020). Estructura forestal global a partir de interacciones locales: nuevas funciones vecinas más cercanas para comprender la ontogénesis de la estructura forestal global. *Forest Ecosystems*, 7 (1): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00224-5>

Pretzsch, H. (2009). *Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model*. Springer Verlag. Berlin, Germany. 664 p. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4_1).

R Core Team. (2019). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.r-project.org/>

Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, A. R., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C. C. y Acevedo-Sandoval, A. (2013). Escenarios de carbono para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9 (1): 17-21. <https://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v9-n1-3-escenarios-de-carbono-para-el-bosque-de-oyamel-del-parque-nacional-el-chico-hidalgo-mexico.pdf>

Reyes-Hernández, V. J., J. J. Vargas-Hernández, J. López. U y H. Vaquera-Huerta. (2006). Similitud fenotípica de poblaciones mexicanas de *Pseudotsuga* Carr. *Agrociencia*, 40(4), 545-556.

Roden, J. S., Johnstone, J. A., & Dawson, T. E. (2011). Regional and watershed-scale coherence in the stable-oxygen and carbon isotope ratio time series in tree rings of Coast Redwood (*Sequoia sempervirens*). *Tree-Ring Research*, 67(2): 71-86. <https://doi.org/10.3959/2010-4.1>

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.015>

Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Editorial Limusa.

Rzedowski, J. (1991). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana*, 14: 3-21. <https://doi.org/10.21829/abm14.1991.611>

Schwendtner, O., Recalde, I., Alcalde, J. T., Gómez, J., Cárcamo, S., 2005. Importancia de los árboles senescentes y la madera muerta en la gestión de los bosques naturales. En: S.E.C.F.-Gobierno de Aragón (eds.), Actas 4º Congreso Forestal Español. CD-Rom. Imprenta Repes, S.C. Zaragoza. Tomo 1, pág. 146 (2) (PDF) *El papel de los bosques maduros en la conservación de la biodiversidad*.

[https://www.researchgate.net/publication/283726004\\_El\\_papel\\_de\\_los\\_bosques\\_maduros\\_en\\_la\\_conservacion\\_de\\_la\\_biodiversidad](https://www.researchgate.net/publication/283726004_El_papel_de_los_bosques_maduros_en_la_conservacion_de_la_biodiversidad)

Shannon, C. E., 1948. The mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal. 27(3): 379-423 pp. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>

Silva-Arredondo, F. M., & Návar-Cháidez, J. D. J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y bosques*. 18 (1): 77-88. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811139>

Solís Sánchez, J., A. Blanco García, C. Sáenz Romero, M. Méndez Toribio, L. López Toledo. (2018). El cambio climático y las coníferas mexicanas. CONABIO. *Biodiversitas*, 141: 7-10.

Sorensen, F. C., & Cress, D. W. (1994). Effects of sib mating on cone and seed traits in coastal Douglas-fir. *Silvae genetica*, 43: 338-338.

Sotomayor, C. (2008). *Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas*. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3497.4884>

Sotomayor-Castellanos, J. R., & Hernández-Maldonado, S. A. (2012). Características elásticas de maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 8 (2): 3-78.  
[https://www.researchgate.net/publication/261064509\\_Caracteristicas\\_elasticas\\_de\\_maderas\\_mexicanas](https://www.researchgate.net/publication/261064509_Caracteristicas_elasticas_de_maderas_mexicanas)

Swetnam, T. W., & Lynch, A. M. (1993). Multicentury, regional-scale patterns of western spruce budworm outbreaks. *Ecological Monographs*, 63(4): 399-424.  
<https://doi.org/10.2307/2937153>

Torres, D. (2006). *Evaluación de la regeneración natural de tres poblaciones de Pseudotsuga sp. en el estado de Tlaxcala*. [Tesis Profesional Universidad Autónoma de Tlaxcala].

UNESCO, (1980). *Ecosistemas de los bosques tropicales. Informe sobre el estado de conocimientos*. París: UNESCO.

Urbano, A. R., & Keeton, W. S. (2017). Carbon dynamics and structural development in recovering secondary forests of the northeastern US. *Forest Ecology and Management*, 392: 21-35.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.03>

Valverde, T., & Silvertown, J. (1997). Canopy closure rate and forest structure. *Ecology*, 78 (5): 1555-1562. University. Corvallis, Or. 32 p.

Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Reyes-Hernández, V. J., Domínguez-Alvarez, F. A., & Mápula-Larreta, M. (2004). *Natural populations of Douglasfir in*

*Mexico: current status and needs for conservation. In Silviculture and the Conservation of Genetic Resources for Sustainable Forest Management: Proceedings of the Symposium of the North American Forest Commission, Forest Genetic Resources and Silviculture Working Groups, and the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO).*

Vargas-Larreta, B., J. J. Corral-Rivas, O. A. Aguirre-Calderón, J. O. López-Martínez, H. M. De los Santos-Posadas, F. J. Zamudio-Sánchez, J. E. Treviño-Garza, M. Martínez-Salvador, C. G. Aguirre-Calderon. (2017). SiBiFor: Forest biometric system for forest management in Mexico. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>

Vázquez-Cuecuecha, O. G., Zamora-Campos, E. M., García-Gallegos, E., & Ramírez-Flores, J. A. (2015). Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. *Madera y bosques*, 21(1): 129-138. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211437>

Velasco-García, M. V., López-Upton, J., Angeles-Pérez, G., Vargas-Hernández, J., & Guerra-de la Cruz, V. (2007). Dispersión de semillas de *Pseudotsuga menziesii* en poblaciones del centro de México. *Agrociencia*, 41(1), 121-131.

Villavicencio G., R., A. L. Santiago P., J. D. J. Godínez H., J. M. Chávez A. y S. L. Toledo G. (2012). Efecto de la fragmentación sobre la regeneración natural en la Sierra de Quila, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(11): 09-24. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i11.514>

Wédjangnon, A. A., Kuiga, N. B. S., Houêchégnon, T., & Ouinsavi, C. A. (2020). Spatial distribution and interspecific association patterns between *Mansonia altissima* A. Chev., *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn and *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. in a moist semi-deciduous forest. *Annals of Forest Science*, 77(1): 1-11. <https://doi.org/10.25901/5dce7f2714885>

Wilcox, R. R. (2005). *Introduction to robust estimation and hypothesis testing (Statistical Modeling and Decision Science)*. Academic Press.

Yang, X., Yan, H., Li, B., Han, Y., & Song, B. (2018). Spatial distribution patterns of *Symplocos congeners* in a subtropical evergreen broad-leaf forest of southern China. *Journal of forestry research*, 29 (3): 773-784. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0451-2>

Yu H., Wiegand T., Yang X., Ci L. (2009). The impact of fire density-dependent mortality on the spatial patterns of a pine forest in the Hulun Buir sandland, Inner Mongolia, China. *Forest Ecology and Management*, 257: 2098-2017. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.019>

Zanne, A.E., G.Lopez-Gonzalez, D.A. Coomes, J. Ilic, S. Jansen, S.L. Lewis, R.B. Miller, N.G. Swenson, M.C. Wieman , and J. Chave. 2009. Global Wood Density Database. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

Zhang, G., Hui, G., Hu, Y., Zhao, Z., Guan, X., von Gadow, K., & Zhang, G. (2019). Designing near-natural planting patterns for plantation forests in China. *Forest Ecosystems*, 6 (1): 28. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0187-x>