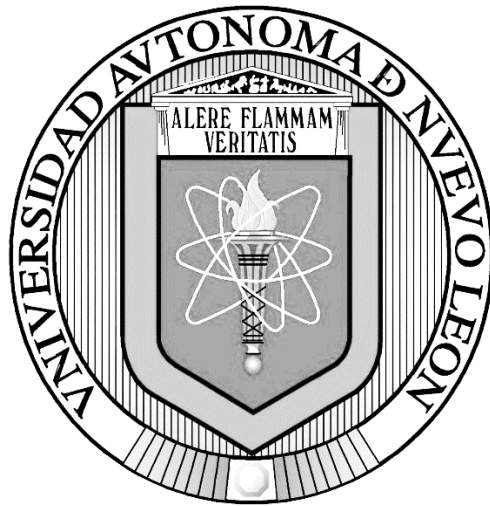


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DE
BOSQUES TEMPLADOS BAJO MANEJO FORESTAL EN EL ESTADO DE
DURANGO, MÉXICO**

POR

M. C. EDGAR SILVA GONZÁLEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

Septiembre, 2023

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DE
BOSQUES TEMPLADOS BAJO MANEJO FORESTAL EN EL ESTADO DE
DURANGO, MÉXICO**

POR

M. C. EDGAR SILVA GONZÁLEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

Septiembre, 2023

**CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DE
BOSQUES TEMPLADOS BAJO MANEJO FORESTAL EN EL ESTADO DE
DURANGO, MÉXICO**

Aprobación de Tesis



Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

Director



Dr. Marco Aurelio González Tagle

Co-director



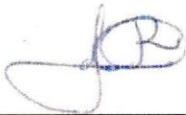
Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

Asesor



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

Asesor



Dr. José Javier Corral Rivas

Co-director externo

Septiembre, 2023

Declaro bajo protesta de decir verdad que la información y documentación de la presente investigación es verídica y fue desarrollada para obtener el grado de Doctor en Ciencias con Orientación en Manejo de los Recursos Naturales, donde se utiliza información de diversos autores se otorgan los créditos correspondientes

M. C. Edgar Silva González

Septiembre, 2023

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza necesaria para seguir por el buen camino, y el poder despertar cada nuevo día. Porque a pesar de los tropiezos en la vida, los momentos de desdicha, puedo estar con quien ahora me necesita.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por concederme la oportunidad y otorgarme el apoyo económico para realizar mis estudios de grado de Doctor en Ciencias en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por proporcionarme las herramientas necesarias para concluir esta etapa importante de mi vida.

Con mucho cariño al **Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón** por su asesoría, apoyo, tiempo, atención, interés y excelente disposición para culminar esta importante etapa académica, y sobre todo por su excelente amistad.

Con mucho respeto para el **Dr. Eduardo Alanís Rodríguez** por su amistad, disposición, apoyo y excelentes consejos para poder hacer posible esta investigación.

Al Dr. Marco Aurelio González Tagle, por su tiempo, disposición, y sus contribuciones en el mejoramiento de este trabajo profesional.

Al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza agradeciendo su generosidad, disposición, apoyo y excelentes contribuciones en el desarrollo de esta investigación de tesis.

Con admiración y respeto para el **Dr. José Javier Corral Rivas** por tener la generosidad de aportar información relevante, tanto de datos de campo como análisis estadísticos para llevar a cabo esta investigación, por su disponibilidad y por su tiempo.

Al Dr. José Encarnación Luján Soto, por su amistad, por su tiempo y dedicación, por su apoyo en el análisis estadístico para poder culminar este trabajo y por su interés, además de motivación para poder concluir con éxito este grado académico.

DEDICATORIA

‡ Con mucho cariño, a mi querida madre, la señora **Enriqueta González Lugo** porque fue una persona incansable, por demostrarme que siempre hay que seguir adelante, por darme siempre su amor y apoyo incondicional, y por enseñarme a no rendirme, a mantenerme siempre con la frente en alto, a ser una persona responsable y que en donde Dios quiera que este, sé que está orgullosa de mi.

Con mucho Amor, a mi hija menor **Aisha Yamileth**, por ser mi motivación más grande, y por proyectarme esas fuerzas para seguir adelante, por ser un Amor incondicional.

Por su puesto a mi hija mayor **Kendra Geraldine**, por ser una de mis motivaciones más grandes.

ÍNDICE

RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN.....	4
HIPÓTESIS	5
OBJETIVOS.....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	5
CAPÍTULO I. CAMBIOS EN LA DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA ARBÓREA DE UN BOSQUE TEMPLADO BAJO DOS TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN DURANGO, MÉXICO.....	7
Resumen	7
Abstract.....	8
1. Introducción.....	9
2. Materiales y métodos	10
2.1 Área de estudio	10
2.2 Análisis de datos.....	11
2.3 Diversidad.....	12
2.4 Parámetros ecológicos, índice de valor de importancia y volumen fustal	13
2.5 Análisis estadístico.....	15
3. Resultados	15
3.1 Diversidad.....	16
3.2 Parámetros ecológicos, índice de valor de importancia y volumen fustal	17
4. Discusión.....	23
4.1 Diversidad.....	23
4.2 Parámetros ecológicos, índice de valor de importancia y volumen fustal	24
CAPÍTULO II. PATRONES DE ESTRUCTURA Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL EN BOSQUES TEMPLADOS BAJO MANEJO FORESTAL EN EL NOROESTE DE MÉXICO	27
Resumen	27

Abstract	27
1. Introducción	29
2. Materiales y métodos	30
2.1 Área de estudio	30
2.2 Análisis de la información	31
2.3 Caracterización del patrón de análisis de puntos a nivel vecindad	32
2.4 Caracterización del patrón de análisis de puntos	35
2.5 Estimación de los índices y corrección del efecto de borde	36
3. Resultados	37
3.1 Caracterización del patrón de análisis a nivel vecindad	41
3.2 Caracterización del patrón de análisis de puntos	43
4. Discusión	57
4.1 Caracterización del patrón de análisis a nivel vecindad	57
4.2 Caracterización del patrón de análisis de puntos	60
Conclusiones generales	62
Bibliografía	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Número de sitios analizados, nombre del ejido al que pertenecen, inventario 1, 2 y 3, y año de corta de acuerdo al tratamiento silvícola aplicado.	12
Cuadro 2. Parámetros ecológicos estimados e índice de valor de importancia.....	13
Cuadro 3. Ecuaciones de volumen fustal para las especies de la región de El Salto presentes en la UMAFOR 1008.	14
Cuadro 4. Nombre científico, nombre común y familia registradas en los doce sitios y tres inventarios dentro del área de estudio.	15
Cuadro 5. Parámetros, indicadores ecológicos e índice de valor de importancia para el método de Selección en los tres inventarios (Ordenados de manera ascendente de acuerdo al IVI).....	18
Cuadro 6. Parámetros, indicadores ecológicos e índice de valor de importancia para el método de aclareos en los tres inventarios (Ordenados de manera ascendente de acuerdo al IVI).....	20
Cuadro 7. Número de árboles, área basal y volumen fustal por ha para los sitios muestreados en los tres inventarios analizados en este estudio.	22
Cuadro 8. Número de sitios evaluados, nombre del ejido al que pertenecen, tratamiento silvícola, año de instalación y año de corta para los catorce sitios analizados en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.....	31
Cuadro 9. Nombre de la especie, nombre común y familia registrados en ambos inventarios dentro de los sitios permanentes bajo manejo forestal en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.....	37
Cuadro 10. Características dasométricas de los sitios permanentes de investigación forestal y de suelos bajo manejo en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.....	38
Cuadro 11. Relación del registro de árboles en tiempo 1 y 2, muertos en pie, muertos caídos, árboles extraídos y árboles incorporados registrados en los sitios permanentes bajo manejo en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.....	39
Cuadro 12. Relación del registro de volumen de los sitios permanentes bajo manejo en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.....	40

Cuadro 13. Valores de los índices de estructura evaluados para los 14 sitios bajo manejo en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango..... 42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los sitios evaluados en la localidad de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango.....	11
Figura 2. Valores del índice de diversidad de Shannon (H') evaluados para los tratamientos de selección y aclareos en los tres inventarios. Las letras diferentes indican diferencia significativa ($\alpha=0.05$).....	16
Figura 3. Número de individuos por categorías diamétricas para las áreas intervenidas mediante el método de selección (A) y aclareos (B).....	22
Figura 4. Número de árboles (A), área basal (B) y volumen fustal (C) por ha para los doce sitios en los tres inventarios analizados.....	23
Figura 5. Ubicación del área de estudio y localización de los 14 sitios permanentes de investigación forestal y de suelos bajo manejo forestal en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.....	30
Figura 6. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 1 en tiempo 1 y tiempo 2.....	44
Figura 7. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 2 en tiempo 1 y tiempo 2.....	45
Figura 8. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 3 en tiempo 1 y tiempo 2.....	46
Figura 9. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 4 en tiempo 1 y tiempo 2.....	47
Figura 10. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 5 en tiempo 1 y tiempo 2.....	48
Figura 11. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 6 en tiempo 1 y tiempo 2.....	49
Figura 12. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 7 en tiempo 1 y tiempo 2.....	50
Figura 13. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 8 en tiempo 1 y tiempo 2.....	51

Figura 14. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 9 en tiempo 1 y tiempo 2.....	52
Figura 15. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 10 en tiempo 1 y tiempo 2.....	53
Figura 16. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 11 en tiempo 1 y tiempo 2.....	54
Figura 17. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 12 en tiempo 1 y tiempo 2.....	55
Figura 18. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 13 en tiempo 1 y tiempo 2.....	56
Figura 19. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 14 en tiempo 1 y tiempo 2.....	57

RESUMEN

Los bosques templados pertenecientes al estado de Durango son de importancia económica puesto que generan una alta cantidad de ingresos para la mayoría de sus comunidades, además de ser el sustento de miles de familias y hogares. Estos bosques son característicos por ser mixtos e irregulares, los cuales han sido objeto de aprovechamiento forestal por diversos sistemas silvícolas, regulando así su complejidad. Particularmente, en los bosques de Durango se han llevado a cabo diversas investigaciones para evaluar la composición, diversidad y estructura de sus comunidades vegetales, siendo la mayoría de estas puntuales, generando información solo descriptiva, sin embargo, investigaciones que evalúen el efecto que genera el manejo forestal, aun son todavía escasas. En la presente investigación se realizó un análisis para conocer la caracterización de la diversidad arbórea y la estructura forestal de áreas bajo manejo forestal en bosques templados de este estado. La metodología de investigación se llevó a cabo mediante el monitoreo de los Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos (SPIFyS), donde se obtuvo información dasométrica descrita a continuación: especie, diámetro normal, altura total, así como azimut y distancia de cada uno de los árboles registrados al centro del sitio, los cuales cuentan con una dimensión de 2500 m². Para cumplir con el objetivo principal de este estudio, se desarrollaron dos temas de investigación. Primeramente se comparó la diversidad y estructura arbórea de doce sitios permanentes, de los cuales seis fueron tratados con el método de selección y seis con aclareos. Mediante del índice de diversidad de Shannon-Wiener se compararon los tratamientos entre sí, en tres periodos de evaluación (inventario 1, inventario 2 e inventario 3), para posteriormente, comparar el IVI de cada tratamiento a través del tiempo, por último para cada sitio se comparó el número de árboles por ha, área basal y volumen fustal en los tres periodos de evaluación. Finalmente, en el segundo trabajo se llevó a cabo una evaluación de los patrones de estructura y patrones de distribución espacial mediante el análisis de catorce sitios permanentes (SPIFyS), los cuales siete fueron operados con selección, seis con primer aclareo y uno con un segundo aclareo. Para comparar los patrones de estructura se utilizaron seis índices; el índice de mezcla de especies de Gadow, el índice de distribución espacial, el índice de información direccional

media de Corral, el índice de diferenciación diamétrica, el índice de diferenciación en altura y el índice de dominancia, mientras que, para conocer el patrón de distribución espacial se utilizó la función K de Ripley. De acuerdo con las diferentes evaluaciones realizadas se logró analizar y conocer el efecto que generan algunos tratamientos silvícolas sobre la diversidad y estructura arbórea en bosques templados del estado de Durango.

ABSTRACT

The temperate forests belonging to the state of Durango are of economic importance since they generate a high amount of income for the majority of their communities, in addition to being the livelihood of thousands of families and homes. These forests are characteristic for being mixed and irregular, which have been subject to forestry use by various silvicultural systems, thus regulating their complexity. Particularly, in the forests of Durango, various investigations have been carried out to evaluate the composition, diversity and structure of its plant communities, the majority of these being specific, generating only descriptive information, however, investigations that evaluate the effect generated by the forest management, are still scarce. In the present investigation, an analysis was carried out to know the characterization of tree diversity and forest structure of areas under forest management in temperate forests of this state. The research methodology was carried out by monitoring the Permanent Forest and Soil Research Sites (SPIFyS), where dasometric information described below was obtained: species, normal diameter, total height, as well as azimuth and distance of each one of the trees registered in the center of the site, which have a size of 2500 m². To meet the main objective of this study, two research topics were developed. First, the diversity and tree structure of twelve permanent sites were compared, of which six were treated with the selection method and six with thinning. Using the Shannon-Wiener diversity index, the treatments were compared with each other, in three evaluation periods (inventory 1, inventory 2 and inventory 3), to subsequently compare the IVI of each treatment over time, finally for each site, the number of trees per ha, basal area and stem volume were compared in the three evaluation periods. Finally, in the second work, an evaluation of the structure patterns and spatial distribution patterns was carried out through the analysis of fourteen permanent sites (SPIFyS), of which seven were operated with selection, six with a first thinning and one with a second thinning. To compare the structure patterns, six indices were used; the Gadov species mixing index, the spatial distribution index, the Corral mean directional information index, the diameter differentiation index, the height differentiation index and the dominance index, while, to know the pattern of spatial distribution, Ripley's K function was used. According

to the different evaluations carried out, it was possible to analyze and understand the effect that some silvicultural treatments generate on the diversity and tree structure in temperate forests in the state of Durango.

INTRODUCCIÓN

México es poseedor de una gran diversidad de ecosistemas naturales, de los cuales los matorrales xerófilos abarcan un 41%, seguido de los bosques templados con un 24% y las selvas un 23% (Conafor, 2009). Las áreas templadas ocupan cerca de 46 millones de hectáreas, las cuales se distribuyen en la Sierra Madre Occidental, la Sierra Volcánica Transversal, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre del Sur (González-Medrano, 2003). La Sierra Madre Occidental (SMO) es el sistema montañoso más largo y más continuo, su extensión casi paralelo con el océano pacífico abarca desde el norte de Sonora y Chihuahua hasta Nayarit y Jalisco donde converge con la Sierra Volcánica Transversal (Rzedowski, 2006). Dentro de la SMO, el estado de Durango cuenta con una gran variedad de especies arbóreas de coníferas y latifoliadas, entre las que se encuentran 20 especies de pino y 43 de encino (González-Elizondo et al., 2006).

La diversidad, estructura y densidad son consideradas las principales características de los bosques. El término diversidad se emplea como diversidad de especies, mientras que, la estructura de un bosque se define por las principales características del estrato arbóreo en el espacio, considerando distribución de mezcla de especies y distribución de diferenciación dimensional (Gadow et al., 2007; Graciano-Ávila et al., 2019; Graciano et al., 2017; Manzanilla-Quijada, 2021; Méndez-Osorio, 2018).

En la caracterización estructural de los ecosistemas forestales se determina una condición básica para la toma de decisiones sobre la gestión de estos bosques (Aguirre et al., 2003), por lo que la estructura del estrato arbóreo puede considerarse como la herramienta más utilizable en la descripción y ordenación forestal mediante cuatro principales razones (Kint et al., 2000):

- 1) la estructura de un bosque se encuentra relacionada con el hábitat de muchos animales y especies de plantas, por lo que es determinada como un indicador de la biodiversidad. Es conveniente utilizar variables cuantitativas de biodiversidad ecológicamente relevantes e interpretables de las comunidades de plantas, como indicadores de riqueza, uniformidad y la proporción de las especies (Magurran, 1988), considerando que estos métodos convencionales no determinan las

dimensiones de las especies o su distribución en el espacio, dejando a un lado la complejidad estructural.

2) la estructura forestal es una fuente de información relevante para el manejador del bosque. Mediante la descripción cuantitativa del impacto de las prácticas silvícolas se pueden obtener escenarios cambiantes y la evolución de la biodiversidad y producción de madera mediante la estructura de las masas forestales.

3) la estructura forestal de un tipo particular de bosque (bajo manejo o de conservación) define un conjunto de parámetros, mismos que servirán de referencia para gestionar métodos de desarrollo forestal a largo plazo.

4) una simple descripción de la estructura forestal puede reconstruir el bosque por computadora, lo que ofrece una alta gama de posibles aplicaciones respecto a los inventarios del bosque.

Diversos métodos se han propuesto para cuantificar la estructura de los bosques, los cuales se pueden dividir en dos categorías: 1) no espaciales y 2) espaciales (Kint et al., 2003). Los métodos no espaciales son aquellos que describen las características medias de los bosques, sin considerar la posición de los árboles. Los índices para esta caracterización describen la diversidad de especies, la estructura vertical y la estructura horizontal de las masas arbóreas. Algunos ejemplos son el índice de Shannon-Wiener y el índice de Simpson (Magurran, 1988), el índice de valor de importancia (Alanís-Rodríguez et al., 2020) y el índice de Pretzsch (Pretzsch, 1996). Por otro lado, los métodos espaciales son aquellos que utilizan índices basados en el método del vecino más cercano. Gadow & Hui, 1999 proponen describir la diversidad estructural mediante tres componentes: mezcla de especies, evaluada mediante la cuantificación de la posición mutua de diferentes especies de árboles sobre el terreno; distribución espacial o posicionamiento de los árboles en el área y diferenciación de tamaños; que describe la relación de las dimensiones relativas de los árboles vecinos de manera vertical u horizontal mediante diámetros y alturas. Otra manera de evaluar métodos espaciales son las técnicas estadísticas basadas en el análisis de patrón de puntos, puesto que describen de manera detallada la estructura espacial de un bosque mediante la

posición de todos los árboles sobre el terreno, mediante las distancias entre todos los pares de puntos (Kint et al., 2003).

La mayoría de los bosques se encuentran sujetos a constantes perturbaciones debido a la extracción forestal (Corral-Rivas et al., 2010), en los bosques bajo aprovechamiento, los tratamientos silvícolas modifican su estructura, por lo que su conocimiento, así como la dinámica de sus rodales es esencial para garantizar su sostenibilidad (Castellanos-Bolaños et al., 2008). Con base en lo anteriormente descrito, se definió el objetivo de la presente investigación de tesis, el cual fue analizar la caracterización de la estructura y diversidad arbórea de bosques templados bajo manejo forestal en el estado de Durango, México.

JUSTIFICACIÓN

En el manejo de los bosques el aprovechamiento forestal genera un impacto en los componentes de estructura y biodiversidad, modificando la dinámica de crecimiento de estos ecosistemas. Además, las prácticas silvícolas generan condiciones de desarrollo para las especies de mayor importancia económica y minimiza la proporción de especies de igual importancia ecológica.

En México de manera particular, la mala aplicación del manejo forestal es considerada una de las causas de degradación de los bosques, puesto que ha sido muy selectivo sobre las especies de árboles con un alto valor económico, lo que ha ocasionado un cambio en la composición y función de estas áreas.

La importancia sobre el análisis y evaluación de la estructura y diversidad arbórea, contribuye a una comprensión sobre las condiciones actuales del bosque, y así conocer como ha sido sobrellevada la gestión forestal. Por lo tanto, este tipo de información podrá crear y mejorar planes de investigación, conservación, manejo y el uso sustentable de los recursos forestales.

Por lo que en la presente investigación, se estudió el análisis de la estructura y diversidad en áreas bajo manejo forestal a través del monitoreo de sitios permanentes de investigación mediante los métodos silvícolas de MMOBI y MDS.

HIPÓTESIS

- La diversidad de áreas intervenidas mediante aclareos es estadísticamente igual a la diversidad de áreas intervenidas con selección, al mismo tiempo que la estructura, densidad, área basal y volumen fustal se mantiene para cada tratamiento en un intervalo de diez años.
- Los patrones de estructura y distribución espacial no se modifican al aplicar diferentes métodos silvícolas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la caracterización de la estructura y diversidad arbórea de bosques templados bajo manejo forestal en el estado de Durango, México.

Objetivos específicos

- Comparar la diversidad y estructura arbórea de un bosque templado bajo los tratamientos silvícolas de selección y aclareo en Durango, México.
- Evaluar patrones de estructura y distribución espacial mediante el análisis de catorce sitios permanentes intervenidos mediante selección y aclareos.

CAPÍTULO I

**CAMBIOS EN LA DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA ARBÓREA DE UN
BOSQUE TEMPLADO BAJO DOS TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS
EN DURANGO, MÉXICO**

**CHANGES IN THE DIVERSITY AND TREE STRUCTURE OF A
TEMPERATE FOREST UNDER TWO SILVICULTURAL
TREATMENTS IN DURANGO, MEXICO**

CAPÍTULO I. CAMBIOS EN LA DIVERSIDAD Y ESTRUCTURA ARBÓREA DE UN BOSQUE TEMPLADO BAJO DOS TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN DURANGO, MÉXICO

Resumen

La diversidad y la estructura son atributos importantes de los bosques que pueden ser modificadas a través de diferentes tratamientos silvícolas. En el presente estudio se comparó la diversidad y estructura arbórea de un bosque templado bajo los tratamientos silvícolas de selección y aclareo. Mediante el uso de datos dendrométricos de seis sitios intervenidos silvícolamente con el método de selección y de seis con aclareos se determinó el índice de diversidad de Shannon (H') para cada tratamiento silvícola, en tres periodos de evaluación (inventario 1, inventario 2 e inventario 3). Posteriormente se realizó la prueba de similitud o diferencia de diversidad-abundancia *t de Hutcheson* para comparar la diversidad entre tratamientos en cada periodo de evaluación. Para cada tratamiento en cada periodo de evaluación se determinaron los parámetros ecológicos de abundancia, mediante el número de árboles por ha; dominancia, obtenida con el área basal por ha; frecuencia, con la presencia de las especies en los sitios evaluados; y un valor ponderado de índice de valor de importancia (IVI), mismos que se analizaron mediante pruebas de Kruskal-Wallis (K-W). Finalmente, por sitio y en los tres periodos evaluados se estimaron el número de árboles, área basal y volumen fustal por ha, mismos que fueron evaluados mediante Kruskal-Wallis y ANOVA. Los resultados obtenidos mediante la prueba de similitud o diferencia de diversidad-abundancia *t de Hutcheson* muestran diferencias estadísticas significativas ($P < 0.5$) entre los tratamientos de selección y aclareos en los inventarios 1, 2 y 3, respectivamente. Por otra parte, la prueba estadística de Kruskal-Wallis no demostró diferencias significativas en los valores promedios del número de árboles, área basal, frecuencia e IVI de cada tratamiento. Por último, el número de árboles, área basal y el volumen fustal de cada sitio no evidencio diferencias significativas al implementar las pruebas estadísticas de Kruskal-Wallis y ANOVA, por lo que se determinó que la diversidad y estructura arbórea no se modifica al aplicar los tratamientos silvícolas analizados.

Palabras clave: área basal, índice de valor de importancia, número de árboles, parámetros ecológicos, volumen fustal.

Abstract

Diversity and structure are important attributes of forests that can be modified through different silvicultural treatments. In the present study, the diversity and tree structure of a temperate forest under silvicultural treatments of selection and thinning were compared. Using dendrometric data from six silviculturally intervened sites with the selection method and six with thinnings, the Shannon diversity index (H') was determined for each silvicultural treatment, in three evaluation periods (inventory 1, inventory 2 and inventory 3). Subsequently, the Hutcheson's t test of similarity or difference of diversity-abundance was performed to compare the diversity between treatments in each evaluation period. For each treatment in each evaluation period, the ecological parameters of abundance were determined, through the number of trees per ha; dominance, obtained with the basal area per ha; frequency, with the presence of the species in the evaluated sites; and a weighted value of the Importance Value Index (IVI), which were analyzed using Kruskal-Wallis (K-W) tests. Finally, by site and in the three periods evaluated, the number of trees, basal area and stem volume per ha were estimated, which were evaluated by Kruskal-Wallis and ANOVA. The results obtained through the Hutcheson's t test of similarity or difference of diversity-abundance show significant statistical differences ($P < 0.5$) between the selection and thinning treatments in inventories 1, 2 and 3, respectively. On the other hand, the Kruskal-Wallis statistical test did not show significant differences in the mean values of the number of trees, basal area, frequency and IVI of each treatment. Finally, the number of trees, basal area and stem volume of each site did not show significant differences when implementing the Kruskal-Wallis and ANOVA statistical tests, so it was determined that the diversity and tree structure do not change when applying the silvicultural treatments analyzed.

Key words: basal area, importance value index, number of trees, ecological parameters, stem volume.

1. Introducción

En el manejo forestal se involucran decisiones y actividades para el uso sustentable, conservación y la promoción de los recursos del bosque (Aguirre-Calderón, 2015). El objetivo del manejo forestal sustentable es satisfacer las necesidades actuales de la sociedad y no comprometer la provisión de los bienes y servicios de los ecosistemas en un futuro (Aguirre-Calderón, 2015; Monarrez-Gonzalez et al., 2020). En áreas bajo manejo forestal, los tratamientos silvícolas modifican la estructura arbórea de los bosques, es por ello que su conocimiento, aunado a la dinámica de rodales, es fundamental para garantizar la sostenibilidad de estos sistemas (Castellanos-Bolaños et al., 2008). La estructura, composición y diversidad del arbolado son características que se deben conocer en bosques bajo manejo, las cuales pueden ser modificadas por eventos naturales (incendios, plagas, enfermedades, sequías, etc.) y antropogénicos que han ocurrido en el pasado (Guevara-Fisher et al., 2021; Hernández-Salas et al., 2013). Esta información permite conocer la condición actual del bosque y determinar las prácticas silvícolas apropiadas para conservar los atributos de los ecosistemas forestales (Rendón-Pérez et al., 2021).

En los bosques del estado de Durango (Noroeste de México) se aplican los métodos silvícolas MMOBI (Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares) y MDS (Método de Desarrollo Silvícola). El MMOBI está orientado a la aplicación de cortas selectivas, en grupos o de manera individual, para promover el mantenimiento de una estructura irregular, generada por árboles de distintas dimensiones en sitios de baja productividad. El MDS se realiza con aprovechamientos periódicos para asegurar el renuevo del bosque, induciendo la masa arbórea a bosques de tipo coetáneo mediante la aplicación de cortas de regeneración a matarrasa o árboles padres y cortas intensivas como los aclareos, en sitios donde las calidades de estación son altas (Santiago-Ramírez et al., 2019; Solís-Moreno et al., 2006; Soto-Cervantes et al., 2021).

La gestión en el ámbito forestal requiere contar con información sobre la diversidad, estructura arbórea, dinámica de crecimiento y productividad del bosque mediante evaluaciones periódicas para detectar cambios generados por diferentes prácticas

silvícolas (López-Hernández et al., 2017). Por lo anteriormente descrito, el objetivo del presente estudio fue comparar la diversidad y estructura arbórea de un bosque templado bajo los tratamientos silvícolas de selección y aclareo en Durango, México.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en cinco ejidos (La Victoria, La Ciudad, El Brillante, La Campana y San Esteban) de la localidad de El Salto, perteneciente al municipio de Pueblo Nuevo del Estado de Durango al Noroeste de México, enmarcado geográficamente entre los paralelos 23° 42' 34.48" y 23° 49' 28.18" de latitud norte y los meridianos 105° 30' 11.83" y 105° 40' 6.56" pertenecientes a la Sierra Madre Occidental (Figura 1). Cuenta con una altitud promedio entre 2 500 y 2 900 m snm. Los tipos de suelo presentes en el área son Litosol, Cambisol y Regosol predomina una textura de gruesa a media (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015), prevalecen los climas de tipo (A)C(W₂), C(W₂), C(E)(M) y C(E)(W₂), con una temperatura promedio de 11.5 °C y una precipitación media anual de 945.3 mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

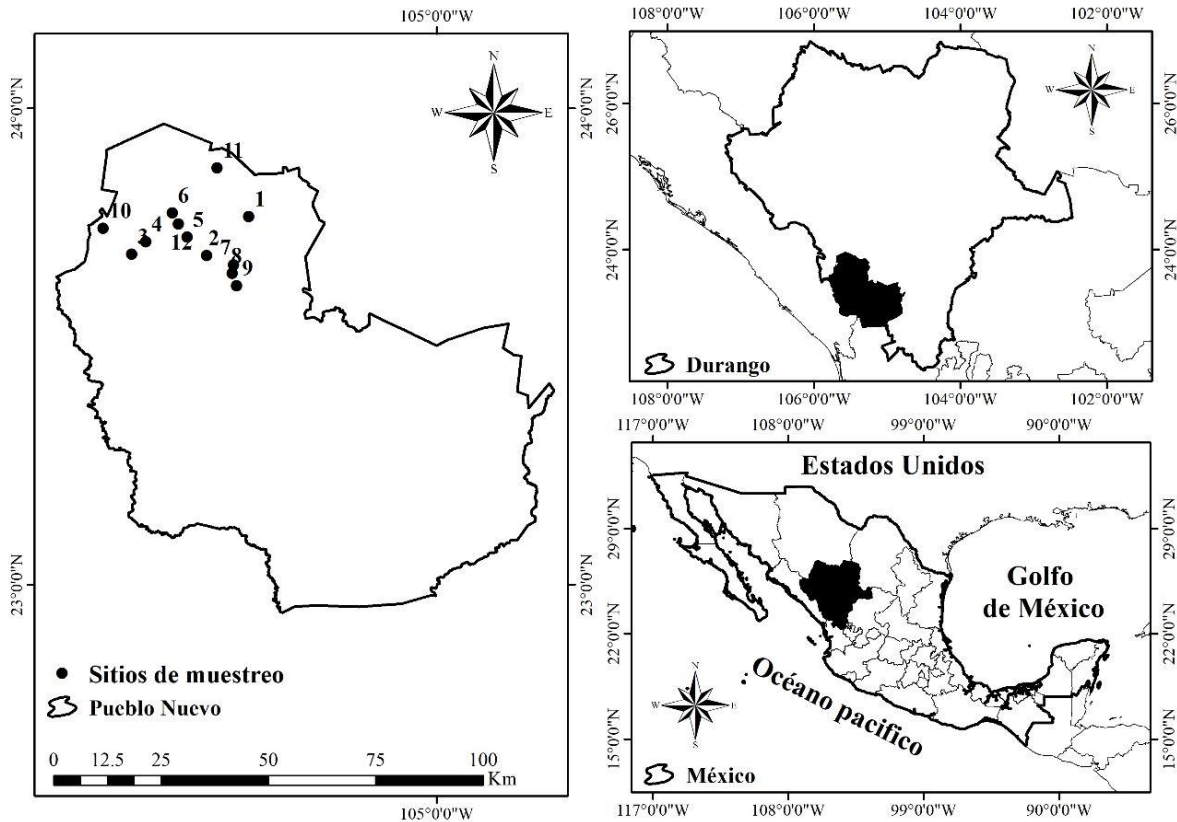


Figura 1. Ubicación de los sitios evaluados en la localidad de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango.

2.2 Análisis de datos

A través de los Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos (SPIFyS), se seleccionaron doce sitios con evidencia de manejo forestal mediante los métodos silvícolas de selección y aclareos, pertenecientes a la UMAFOR 1008. Los sitios fueron establecidos en los años 2007 y 2008 (inventario 1), mediante la metodología descrita por Corral-Rivas et al. (2009), cuentan con dos remediciones realizadas 5 y 10 años después de su establecimiento (inventario 2 y 3, respectivamente) siguiendo la guía para el establecimiento, seguimiento y evaluación de sitios permanentes de monitoreo en paisajes productivos forestales (Corral-Rivas et al., 2013). El tratamiento silvícola aplicado a cada sitio difiere de acuerdo al año de corta proveniente de los diferentes programas de manejo para cada ejido (Cuadro 1). Las comunidades forestales de la región están compuestas por bosques mezclados de los géneros *Pinus* y *Quercus*, *Juniperus*, *Arbutus* y *Alnus*; consideradas rodales

de segundo crecimiento sometidos a explotación forestal desde hace más de 100 años (Colín et al., 2018; Lujan-Soto et al., 2015).

El tamaño de los sitios fue de 2500 m², obteniéndose la siguiente información dasométrica: número de árbol, especie, diámetro normal (> 7.5 cm) y altura total (m).

Cuadro 1. Número de sitios analizados, nombre del ejido al que pertenecen, inventario 1, 2 y 3, y año de corta de acuerdo al tratamiento silvícola aplicado.

Selección					
Sitio	Ejido	inventario 1	inventario 2	inventario 3	Año de corta
1	La Victoria	01/10/2007	21/11/2012	01/12/2017	2013
2	La Victoria	01/11/2007	27/11/2012	02/12/2017	2012
3	La Ciudad	01/03/2008	25/04/2013	02/07/2018	2009
4	La Ciudad	01/03/2008	19/04/2013	05/07/2018	2009
5	La Campana	01/03/2008	09/04/2013	26/06/2018	2008
6	La Campana	01/03/2008	15/04/2013	27/06/2018	2015
Aclareo					
7	El Brillante	01/12/2008	16/12/2013	21/09/2018	2009
8	El Brillante	01/12/2008	11/12/2013	23/09/2018	2012
9	El Brillante	01/12/2008	21/12/2013	05/10/2018	2009
10	La Ciudad	01/03/2008	20/04/2013	26/06/2018	2017
11	San Esteban	09/03/2008	04/04/2013	04/07/2018	2013
12	La Campana	01/03/2008	11/04/2013	28/06/2018	2009

2.3 Diversidad

Para estimar la diversidad de especies de cada tratamiento en cada inventario se utilizó el índice de diversidad de Shannon (H') (Shannon & Weaver, 1949) (Ecuación 1).

$$H' = - \sum p_i (\ln p_i) \quad [1]$$

Donde:

\ln = logaritmo natural

p_i = proporción de los individuos encontrados de la especie i ; se obtiene de la relación (n_i/N)

n_i = número de individuos de la especie i

N = número total de individuos

Los valores obtenidos con el índice de Shannon se compararon con la prueba de hipótesis sobre similitud o diferencia de la diversidad-abundancia *t de Hutcheson* entre los tratamientos de selección y aclareos en los tres inventarios (Corral-Rivas et al., 2005; Hernández-Salas et al., 2013; Magurran, 1988; Solís-Moreno et al., 2006), generada por la ecuación [2] y con los grados de libertad estimados mediante la ecuación [3]

$$t = \frac{H'_{1} - H'_{2}}{(VarH'_{1} + VarH'_{2})^{\frac{1}{2}}} \quad [2]$$

$$df = \frac{(VarH'_{1} + VarH'_{2})^2}{\left[\frac{(VarH'_{1})^2}{N_1}\right] + \left[\frac{(VarH'_{2})^2}{N_2}\right]} \quad [3]$$

Donde:

H' = diversidad del sitio n

$Var H'$ = varianza del sitio n

N = número total de individuos del sitio n

Para la estimación de las varianzas se utilizó la ecuación 4.

$$VarH' = \frac{\sum pi(\ln pi)^2 - (\sum pi \ln pi)^2}{N} - \frac{S-1}{2N^2} \quad [4]$$

2.4 Parámetros ecológicos, índice de valor de importancia y volumen fustal

Para cada periodo de evaluación y para cada tratamiento silvícola se determinaron los valores relativos de abundancia (AR), obtenida con el número de árboles; dominancia (DR), generada en función del área basal; frecuencia (FR), con base en la presencia de las diferentes especies en los sitios; y el índice de valor de importancia (IVI), con la sumatoria de los indicadores ecológicos en valores porcentuales de 0 a 300, y dividiendo el valor entre 3, para cada especie arbórea (Alanís-Rodríguez et al., 2020) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros ecológicos estimados e índice de valor de importancia.

Parámetros e índice	Fórmula	Donde:
Abundancia Relativa (AR)	$AR = \frac{n}{N} * 100$	n= número de individuos de la especie <i>i</i> N = número total de individuos
Dominancia Relativa (DR)	$DR = \frac{g}{G} * 100$	g= área basal de la especie <i>i</i> G= área basal total

Frecuencia Relativa (FR)	$FR = \frac{m}{M} * 100$	m =frecuencia de la especie i en los sitios de muestreo M = número total de sitios de muestreo
Índice de Valor de Importancia (IVI)	$IVI = \frac{AR + DR + FR}{3}$	

Para la mayoría de las especies registradas se determinó el volumen fustal mediante ecuaciones generadas por el Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor) pertenecientes a la UMAFOR 1008, con base en la ecuación de Schumacher y Hall, solo para *Arbutus spp* se utilizó la ecuación generada por Cruz-Cobos et al. (2016) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Ecuaciones de volumen fustal para las especies de la región de El Salto presentes en la UMAFOR 1008.

Nombre científico	Ecuación	Autor
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	$V = 0.000139 * (Dn^{1.3542668}) * (H^{1.2736221})$	ITES-2016
<i>Alnus jorullensis</i> Kunth	$V = 0.0000862 * (Dn^{1.8865539}) * (H^{0.8017336})$	ITES-2016
<i>Arbutus spp</i>	$V = 0.0000116 * (Dn^{2.078374}) * (H^{0.501168})$	Cruz-Cobos et al., 2016
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	$V = 0.0000759 * (Dn^{1.9206334}) * (H^{0.803164})$	UJED-2016
<i>Pinus cooperi</i> C. E. Blanco	$V = 0.0000454 * (Dn^{2.0745395}) * (H^{0.8923251})$	UJED-2016
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	$V = 0.0000546 * (Dn^{1.9482123}) * (H^{0.9702588})$	UJED-2016
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltdl & Cham.	$V = 0.0000372 * (Dn^{2.0194624}) * (H^{1.0269951})$	UJED-2016
<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.	$V = 0.0000607 * (Dn^{1.9179198}) * (H^{0.9319899})$	UJED-2016
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	$V = 0.0000676 * (Dn^{1.9076677}) * (H^{0.9455744})$	UJED-2016
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	$V = 0.0000862 * (Dn^{1.8865539}) * (H^{0.8017336})$	ITES-2016
<i>Quercus rugosa</i> Née	$V = 0.0000373 * (Dn^{2.0588513}) * (H^{0.9271271})$	UJED-2016
<i>Quercus spp</i>	$V = 0.0000626 * (Dn^{2.0409771}) * (H^{0.7503735})$	UJED-2016
<i>Quercus sideroxylla</i> Bonpl.	$V = 0.0000456 * (Dn^{2.0193611}) * (H^{0.8856513})$	UJED-2016

Donde: V : volumen fustal; Dn : diámetro normal; H : altura; ITES: Instituto Tecnológico de El Salto; UJED: Universidad Juárez del Estado de Durango

2.5 Análisis estadístico

A cada parámetro ecológico (abundancia, dominancia y frecuencia), al índice de valor de importancia y volumen fustal se le verificó la distribución normal de sus datos con la prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas con la prueba de Levene para realizar un ANOVA de un factor (igualdad de medias), o en su defecto la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (K-W) (igualdad de medianas), para determinar si existen cambios estadísticos entre los inventarios para ambos tratamientos y para los doce sitios. El nivel de significancia utilizado para las pruebas fue $\alpha=0.05$, todos los análisis se desarrollaron en el programa IBM SPSS Statistics 25.

3. Resultados

Se registraron 18 especies en total durante los tres inventarios, pertenecientes a seis familias y seis géneros, las familias *Pinaceae* y *Fagaceae*, así como los géneros *Pinus* y *Quercus* fueron los de mayor representatividad con cinco especies, seguida de la familia *Ericaceae* y el género *Arbutus* con cuatro especies, *Prunus serotina* Ehrh fue la especie de menor representatividad con el registro de una especie (Cuadro 4).

Cuadro 4. Nombre científico, nombre común y familia registradas en los doce sitios y tres inventarios dentro del área de estudio.

Nombre científico	Nombre común	Familia
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	Aliso	Betulaceae
<i>Alnus jorullensis</i> Kunth	Aliso	Betulaceae
<i>Arbutus arizonica</i> (A. Gray) Sarg.	Madroño de Arizona	Ericaceae
<i>Arbutus bicolor</i> S. González, M. González & P.D. Sørensen	Madroño	Ericaceae
<i>Arbutus madrensis</i> S. González	Madroño roñoso	Ericaceae
<i>Arbutus tessellata</i> P.D Sørensen	Madroño pegajoso	Ericaceae
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	Táscate	Cupressaceae
<i>Pinus cooperi</i> C. E. Blanco	Pino chino	Pinaceae
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	Ocote	Pinaceae
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltdl & Cham.	Pino prieto	Pinaceae
<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.	Pino blanco	Pinaceae

<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	Pino colorado	Pinaceae
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	Capulín	Rosaceae
<i>Quercus rugosa</i> Née	Encino blanco	Fagaceae
<i>Quercus arizonica</i> Sarg	Roble de Arizona	Fagaceae
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	Encino prieto	Fagaceae
<i>Quercus obtusata</i> Bonpl.	Encino roble	Fagaceae
<i>Quercus sideroxyla</i> Bonpl.	Encino colorado	Fagaceae

3.1 Diversidad

El área con tratamiento de selección presentó valores mayores en el índice de diversidad de Shannon (H') en los tres periodos de evaluación (Figura 2), indicando una mayor diversidad de especies. La prueba de similitud o diferencia de la diversidad-abundancia t de *Hutcheson* reveló diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en los tres periodos de evaluación: inventario 1 ($t=2.87$, $t_{(\alpha=0.05, 962)}=1.98$); inventario 2 ($t=3.73$, $t_{(\alpha=0.05, 907)}=1.98$) e inventario 3 ($t=4.89$, $t_{(\alpha=0.05, 1004)}=1.98$).

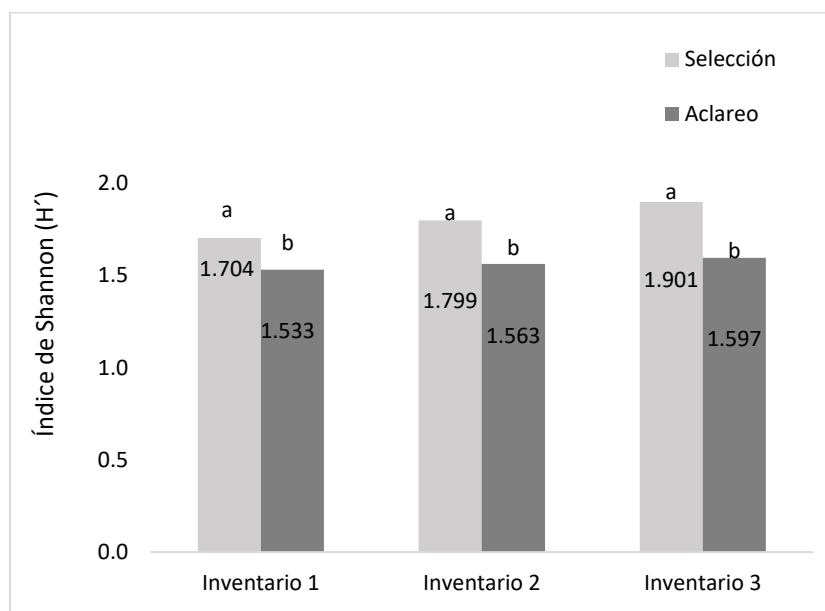


Figura 2. Valores del índice de diversidad de Shannon (H') evaluados para los tratamientos de selección y aclareos en los tres inventarios. Las letras diferentes indican diferencia significativa ($\alpha=0.05$).

3.2 Parámetros ecológicos, índice de valor de importancia y volumen fustal

El número de árboles registrado en los seis sitios en el tratamiento de selección mostró una reducción de 454 ± 55.12 árboles por ha en el inventario 1 a 426.67 ± 47.7 en el inventario 2, pero ascendió a 465.33 ± 46.98 árboles por ha para el inventario 3, dichos cambios no fueron estadísticamente significativos ($\text{Chi}^2 = 0.012$; g. l. = 2: $P = 0.99$). La figura 3 A presenta el comportamiento en el número de árboles por categorías diamétricas en el tratamiento de selección, las clases diamétricas registradas en los tres inventarios muestran una tendencia normal de los datos, característica de rodales maduros. En el primer periodo de evaluación se registraron trece especies; para el segundo periodo se incorporó *Prunus serotina* Ehrh, finalmente en el tercer periodo se obtuvo un registro de dieciséis especies con la incorporación de *Arbutus arizonica* (A. Gray) Sarg. y *Arbutus tessellata* P.D Sørensen, respecto al inventario 2.

El área basal en el inventario 1 registró un valor total de $24.1 \pm 3.5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, el cual disminuyó para el inventario 2, $0.77 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, finalmente aumentó a $25.65 \pm 3.24 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ para el inventario 3; estadísticamente estos cambios no fueron significativos ($\text{Chi}^2 = 0.028$; g. l. = 2: $P = 0.98$). Para el periodo final se registró un incremento del 6.4% de área basal respecto al inventario 1.

Las frecuencias relativas registradas para cada especie en los tres inventarios resultaron ser estadísticamente iguales ($F = 0.096$; g. l. = 2: $P = 0.91$). El género *Pinus* presentó una frecuencia relativa del 50 % en el inventario 1, que se redujo un 11.22 % para el inventario 3, *Arbutus* incrementó 10.55 % en el mismo periodo, mientras que *Quercus* se redujo 0.68 %.

El índice de valor de importancia no registró diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de K-W entre los inventarios 1, 2 y 3, respectivamente, ($\text{Chi}^2 = 0.27$; g. l. = 2: $P = 0.87$). *P. durangensis* fue la especie de mayor representatividad en los tres periodos de evaluación, registrando un valor de 35.98 %, que se redujo un 3.38 % para el inventario 3; seguido de *Q. sideroxylla* con un IVI de 17.8 % en el primer periodo, que aumentó a 18.5 % para el inventario 3, *P. cooperi* aumentó 0.04 % en el intervalo de 10 años (Cuadro 5).

Cuadro 5. Parámetros, indicadores ecológicos e índice de valor de importancia para el método de Selección en los tres inventarios (Ordenados de manera ascendente de acuerdo al IVI).

Selección inventario 1							
Especie	N*ha	AR	AB*ha	DR	Frec	FR	IVI
<i>P. durangensis</i>	192	42.29	12.38	51.37	6	14.29	35.98
<i>Q. sideroxyla</i>	88.67	19.53	4.72	19.59	6	14.29	17.80
<i>P. cooperi</i>	73.33	16.15	3.62	15.02	5	11.90	14.36
<i>P. strobiformis</i>	34.67	7.64	1.02	4.23	4	9.52	7.13
<i>J. deppeana</i>	27.33	6.02	0.47	1.96	5	11.90	6.63
<i>P. teocote</i>	6.67	1.47	0.23	0.95	4	9.52	3.98
<i>A. bicolor</i>	9.33	2.06	0.32	1.34	3	7.14	3.51
<i>Q. crassifolia</i>	4.67	1.03	1.08	4.48	1	2.38	2.63
<i>P. leiophylla</i>	7.33	1.62	0.14	0.60	2	4.76	2.33
<i>A. jorullensis</i>	6.67	1.47	0.05	0.22	2	4.76	2.1
<i>A. madrensis</i>	2	0.44	0.03	0.14	2	4.76	1.78
<i>Q. rugosa</i>	0.67	0.15	0.02	0.07	1	2.38	0.86
<i>A. firmifolia</i>	0.67	0.15	0.01	0.02	1	2.38	0.85
Total (±SD)	454±55.12	100	24.1±3.5	100	42±4.8	100	100±9.97
Selección inventario 2							
<i>P. durangensis</i>	165.33	38.75	11.39	48.84	6	14.63	34.07
<i>Q. sideroxyla</i>	100	23.44	5.32	22.81	6	14.63	20.29
<i>P. cooperi</i>	58.67	13.75	2.84	12.17	5	12.2	12.71
<i>P. strobiformis</i>	31.33	7.34	1.01	4.32	3	7.32	6.33
<i>J. deppeana</i>	24	5.63	0.49	2.1	4	9.76	5.83
<i>P. teocote</i>	6.67	1.56	0.27	1.16	4	9.76	4.16
<i>A. bicolor</i>	10	2.34	0.37	1.57	3	7.32	3.74
<i>Q. crassifolia</i>	6.67	1.56	1.29	5.51	1	2.44	3.17
<i>A. jorullensis</i>	6.67	1.56	0.10	0.41	2	4.88	2.28
<i>A. firmifolia</i>	6.67	1.56	0.06	0.28	2	4.88	2.24
<i>A. madrensis</i>	2.67	0.63	0.04	0.19	2	4.88	1.90
<i>P. leiophylla</i>	6.67	1.56	0.13	0.55	1	2.44	1.52
<i>Q. rugosa</i>	0.67	0.16	0.02	0.08	1	2.44	0.89
<i>P. serotina</i>	0.67	0.16	0.003	0.01	1	2.44	0.87
Total (±SD)	426.67±47.7	100	23.33±3.17	100	41±4.4	100	100±9.42
Selección inventario 3							

<i>P. durangensis</i>	170.67	36.68	12.51	48.78	6	12.24	32.6
<i>Q. sideroxylla</i>	108	23.21	5.18	20.18	6	12.24	18.5
<i>P. cooperi</i>	54	11.6	3.21	12.52	5	10.2	11.4
<i>P. strobiformis</i>	38.67	8.31	1.42	5.52	3	6.12	6.7
<i>J. deppeana</i>	28	6.02	0.59	2.31	4	8.16	5.5
<i>A. bicolor</i>	12	2.58	0.42	1.66	4	8.16	4.1
<i>P. teocote</i>	8	1.72	0.37	1.45	4	8.16	3.8
<i>Q. crassifolia</i>	6.67	1.43	1.32	5.15	2	4.08	3.6
<i>A. firmifolia</i>	16.67	3.58	0.2	0.79	3	6.12	3.5
<i>A. madrensis</i>	3.33	0.72	0.06	0.22	3	6.12	2.4
<i>A. tessellata</i>	2.67	0.57	0.02	0.08	3	6.12	2.3
<i>A. jorullensis</i>	6.67	1.43	0.14	0.56	2	4.08	2.0
<i>P. leiophylla</i>	8	1.72	0.17	0.66	1	2.04	1.5
<i>Q. rugosa</i>	0.67	0.14	0.02	0.08	1	2.04	0.8
<i>P. serotina</i>	0.67	0.14	0.01	0.02	1	2.04	0.7
<i>A. arizonica</i>	0.67	0.14	0.004	0.02	1	2.04	0.7
Total (\pmSD)	465.33\pm46.98	100	25.65\pm3.24	100	49\pm3.5	100	100\pm8.41

Donde: N ha⁻¹: número de árboles por hectárea, AR (%): abundancia relativa; AB m² ha⁻¹; área basal por hectárea; DR (%); dominancia relativa; Frec; frecuencia; FR (%); frecuencia relativa; IVI (%); índice de valor de importancia; SD: desviación estándar.

El número de árboles registrado en los seis sitios en el tratamiento de aclareos no mostró cambios estadísticos significativos en los tres periodos de evaluación (Chi² = 0.14; g. l. = 2: P = 0.93). En el inventario 1 se registró un total de 857.33 \pm 115.86 árboles por ha el cual se redujo a 833.33 \pm 104.98 árboles por ha para el inventario 3. Se registró un total de 13 especies diferentes en el inventario 1, sin embargo, para el inventario 2 y 3 se registraron 15 especies, mediante la incorporación de *Alnus jorullensis* Kunth y *Quercus rugosa* Née. La figura 3 B presenta el número de árboles por categoría diamétrica registrado en los tres inventarios, la mayoría de los árboles se encuentra en las categorías inferiores, presentando una atenuación de los datos en forma de J invertida, característica de rodales jóvenes.

El área basal en el inventario 1 fue de 24.4 \pm 3.01 m² ha⁻¹, el cual se redujo a 23.23 \pm 2.95 m² ha⁻¹ para el inventario 2, finalmente, incrementó a 26.69 \pm 3.42 m² ha⁻¹, de acuerdo con la prueba estadística no paramétrica de Kruskal Wallis estos

cambios no fueron significativos ($\text{Chi}^2 = 0.32$; g. l. = 2: $P = 0.85$). El género *Pinus* registró una dominancia relativa (DR) de 79.82 ± 18.94 % en el inventario 1, que se incrementó a 81.94 ± 18.99 % para el inventario 3, estadísticamente no se registraron cambios significativos ($\text{Chi}^2 = 0.06$; g. l. = 2: $P = 0.97$). *Quercus* redujo su DR 1.91 % entre los tres periodos de evaluación, pero sin registrar cambios estadísticos significativos ($\text{Chi}^2 = 0.37$; g. l. = 2: $P = 0.83$).

Las frecuencias registradas no presentaron cambios estadísticos significativos entre los tres inventarios ($\text{Chi}^2 = 0.16$; g. l. = 2: $P = 0.92$). *Pinus* obtuvo los valores mayores de FR en los tres periodos de evaluación 51.35 ± 4.44 %, 48.72 ± 4.21 % y 47.5 ± 4.11 %, seguido del género *Quercus* con FR de 18.92 ± 6.24 %, 20.51 ± 5.13 % y 20.0 ± 5.0 %, ambos géneros no presentaron cambios estadísticos significativos con valores de ($\text{Chi}^2 = 3.47$; g. l. = 2: $P = 0.18$) y ($\text{Chi}^2 = 3.97$; g. l. = 2: $P = 0.14$), respectivamente.

De acuerdo con el IVI no se presentaron cambios estadísticos significativos entre los inventarios 1, 2 y 3, respectivamente, ($\text{Chi}^2 = 0.42$; g. l. = 2: $P = 0.81$), *P. cooperi* fue la especie con mayor porcentaje de IVI en los tres inventarios, seguido de *P. durangensis* y *Q. sideroxyla* (Cuadro 6).

Cuadro 6. Parámetros, indicadores ecológicos e índice de valor de importancia para el método de aclareos en los tres inventarios (Ordenados de manera ascendente de acuerdo al IVI).

Aclareo inventario 1							
Especie	N ha ⁻¹	AR (%)	AB m ² ha ⁻¹	DR (%)	Frec	FR (%)	IVI (%)
<i>P. cooperi</i>	361.33	42.15	8.93	39.86	5	13.51	31.84
<i>P. durangensis</i>	271.33	31.65	7.44	33.21	5	13.51	26.13
<i>Q. sideroxyla</i>	106	12.36	3.36	15.02	5	13.51	13.63
<i>J. deppeana</i>	18	2.1	0.39	1.76	6	16.22	6.69
<i>P. strobiformis</i>	28.67	3.34	0.66	2.96	5	13.51	6.61
<i>P. leiophylla</i>	22.67	2.64	0.6	2.67	2	5.41	3.57
<i>P. teocote</i>	12	1.4	0.25	1.12	2	5.41	2.64
<i>A. bicolor</i>	1.33	0.16	0.14	0.64	2	5.41	2.07
<i>Q. arizonica</i>	12	1.40	0.24	1.06	1	2.7	1.72
<i>A. arizonica</i>	11.33	1.32	0.24	1.06	1	2.7	1.7
<i>A. tessellata</i>	11.33	1.32	0.11	0.47	1	2.7	1.5

<i>Q. obtusata</i>	0.67	0.08	0.02	0.1	1	2.7	0.96
<i>A. madrensis</i>	0.67	0.08	0.01	0.06	1	2.7	0.95
Total (±SD)	857.33±11.86	100	22.4±3.01	100	37±1.99	100	100±10.15

Aclareo inventario 2

<i>P. cooperi</i>	364.67	43.24	9.53	40.98	5	12.82	32.35
<i>P. durangensis</i>	256	30.36	7.44	32	5	12.82	25.06
<i>Q. sideroxylla</i>	96	11.38	3.13	13.47	5	12.82	12.56
<i>P. strobiformis</i>	30.0	3.56	1.01	4.33	5	12.82	6.9
<i>J. deppeana</i>	22	2.61	0.49	2.09	6	15.38	6.69
<i>P. leiophylla</i>	23.33	2.77	0.66	2.85	2	5.13	3.58
<i>P. teocote</i>	12.67	1.5	0.30	1.3	2	5.13	2.64
<i>A. madrensis</i>	1.33	0.16	0.02	0.08	2	5.13	1.79
<i>Q. arizonica</i>	12	1.42	0.28	1.19	1	2.56	1.73
<i>A. tessellata</i>	11.33	1.34	0.12	0.53	1	2.56	1.48
<i>A. arizonica</i>	7.33	0.87	0.18	0.77	1	2.56	1.4
<i>A. bicolor</i>	4.67	0.55	0.06	0.25	1	2.56	1.12
<i>Q. obtusata</i>	0.67	0.08	0.02	0.11	1	2.56	0.92
<i>Q. rugosa</i>	0.67	0.08	0.01	0.02	1	2.56	0.89
<i>A. jorullensis</i>	0.67	0.08	0.01	0.02	1	2.56	0.89
Total (±SD)	843.33±108.82	100	23.25±2.95±	100	39±1.96	100	100±9.83

Aclareo inventario 3

<i>P. cooperi</i>	361.33	43.36	11.49	43.04	5	12.5	32.97
<i>P. durangensis</i>	241.33	28.96	8.01	30	5	12.5	23.82
<i>Q. sideroxylla</i>	94.67	11.36	3.47	12.99	5	12.5	12.28
<i>P. strobiformis</i>	32.67	3.92	1.31	4.92	5	12.5	7.11
<i>J. deppeana</i>	24.67	2.96	0.58	2.16	6	15	6.71
<i>P. leiophylla</i>	23.33	2.8	0.66	2.49	2	5	3.43
<i>P. teocote</i>	15.33	1.84	0.4	1.5	2	5	2.78
<i>A. tessellata</i>	12	1.44	0.14	0.54	2	5	2.33
<i>A. madrensis</i>	1.33	0.16	0.03	0.1	2	5	1.75
<i>Q. arizonica</i>	12	1.44	0.31	1.15	1	2.5	1.7
<i>A. arizonica</i>	7.33	0.88	0.18	0.67	1	2.5	1.35
<i>A. bicolor</i>	5.33	0.64	0.08	0.3	1	2.5	1.15
<i>Q. obtusata</i>	0.67	0.08	0.03	0.1	1	2.5	0.89
<i>Q. rugosa</i>	0.67	0.08	0.01	0.02	1	2.5	0.87
<i>A. jorullensis</i>	0.67	0.08	0.01	0.02	1	2.5	0.87
Total (±SD)	833.33±104.98	100	26.69±3.42	100	40±1.91	100	100±9.32

Donde: N ha⁻¹: número de árboles por hectárea, AR (%): abundancia relativa; AB m² ha⁻¹; área basal por hectárea; DR (%); dominancia relativa; Frec; frecuencia; FR (%); frecuencia relativa; IVI (%); índice de valor de importancia; ±SD: desviación estándar.

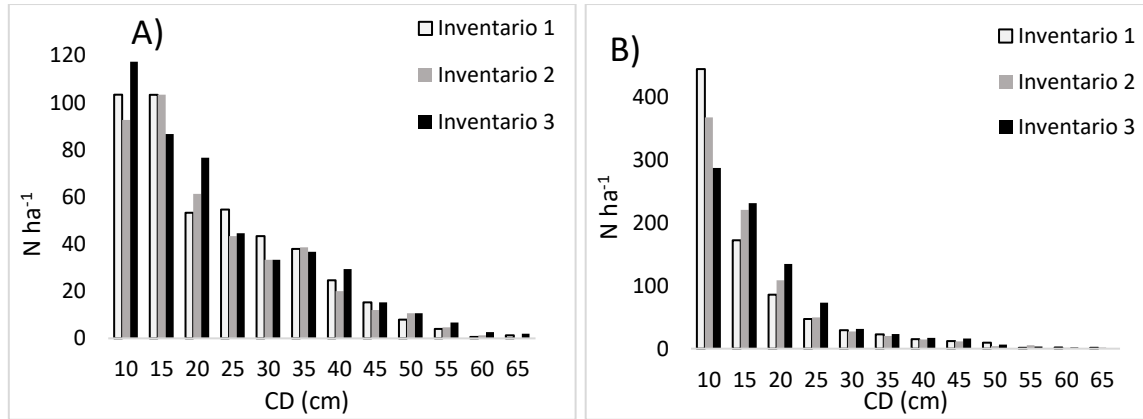


Figura 3. Número de individuos por categorías diamétricas para las áreas intervenidas mediante el método de selección (A) y aclareos (B).

De manera individual, los sitios evaluados no presentaron cambios estadísticos significativos ($P < 0.05$), mediante las variables dasométricas: árboles por ha, área basal (m² ha⁻¹) y volumen fustal (m³ ha⁻¹) (cuadro 7). En el periodo de 10 años, los sitios 1, 2, 6 y 8 registraron un aumento en el número de árboles por ha (figura 4 A). El área basal de los sitios 6 y 12 registraron un decremento de 0.38 m² ha⁻¹ y 0.25 m² ha⁻¹, respectivamente (figura 4 B). Finalmente, para volumen fustal el sitio 6 disminuyó 6.14 m³ ha⁻¹, mientras que, el sitio 8 decreció 19.91 m³ ha⁻¹ (figura 4 C).

Cuadro 7. Número de árboles, área basal y volumen fustal por ha para los sitios muestreados en los tres inventarios analizados en este estudio.

Selección													
Sitio	árboles ha ⁻¹				Área basal (m ² ha ⁻¹)				Volumen (m ³ ha ⁻¹)				
	2008	2013	2018	P (<0.05)	2008	2013	2018	P (<0.05)	2008	2013	2018	P (<0.05)	
1	636	668	764	0.97 K-W	21.13	18.36	22.01	0.92 K-W	173.61	147.27	182.16	0.92 K-W	
2	228	192	260	0.60 K-W	21.23	21.21	23.66	0.65 K-W	200.29	212.43	239.87	0.71 K-W	
3	296	264	276	0.48 K-W	25.22	24.65	28.05	0.70 K-W	321.23	328.21	374.7	0.72 K-W	
4	764	660	656	0.74	30.41	27.06	31.58	0.95	323.76	292.02	356.83	0.88	
5	432	384	420	0.94	22.49	22.16	24.87	0.85	191.2	194.26	215.85	0.87 K-W	
6	368	392	416	0.96 K-W	24.12	26.52	23.74	0.96 K-W	244.01	293.31	237.87	0.98 K-W	

Aclareo

7	1080	1072	1068	0.97 K-W	17.45	25.62	31.25	0.74 K-W	95.68	177.58	250.89	0.74 K-W
8	372	628	672	0.93 K-W	20.41	23.08	25.86	0.76 K-W	233.21	260.46	301.89	0.86 K-W
9	960	872	868	0.67 K-W	22.08	16.85	23.54	0.82 K-W	210.49	119.64	190.58	0.69 K-W
10	1112	1116	976	0.98 K-W	26.12	29.87	29.21	0.93 K-W	264.96	323.98	321.38	0.93 K-W
11	952	844	888	0.93 K-W	17.54	17.02	19.74	0.80 K-W	76.7	78.03	93.85	0.87 K-W
12	668	528	528	0.97 K-W	30.8	27.05	30.55	0.87 K-W	295.16	273.71	308.37	0.83 K-W

Donde: K.W (prueba no paramétrica de Kruskal Wallis).

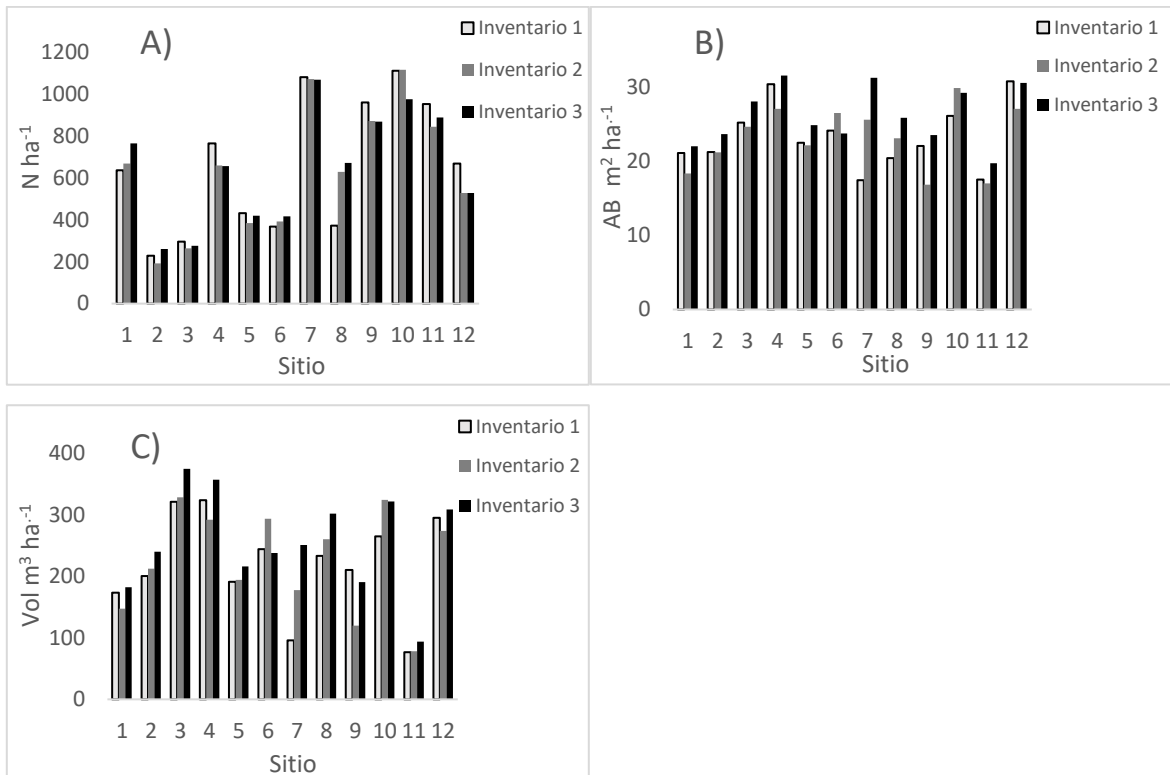


Figura 4. Número de árboles (A), área basal (B) y volumen fustal (C) por ha para los doce sitios en los tres inventarios analizados

4. Discusión

4.1 Diversidad

La diversidad de especies evaluada mediante el índice de diversidad de Shannon entre tratamientos para cada periodo de evaluación difiere de manera constante, presentándose valores más altos en el tratamiento de selección. El área con tratamiento de selección incrementó sus valores ponderados del índice de Shannon (H') mayormente que el área de aclareos. La aplicación del tratamiento de selección

dirigido a especies del género *Pinus* por ser de mayor valor comercial promueve una mayor equitatividad de la proporción de especies dentro de los rodales, en contraste, la aplicación del tratamiento de aclareos mantiene la dominancia de algunas especies ya que las cortas van dirigidas a especies no deseadas. Solís-Moreno et al. (2006) registraron valores de $H' = 0.72$ y $H' = 1.21$, para dos parcelas con los métodos de aclareos y selección, respectivamente, valores inferiores a los reportados en este trabajo. Hernández-Salas et al. (2013), reportaron valores de $H'_1 = 0.400$, $H'_2 = 0.401$ y $H'_3 = 0.347$, en tres periodos de evaluación (1886, 1996 y 2006), en bosques templados de Chihuahua, en áreas con manejo regular. La diferencia de los valores registrados por otros autores con los obtenidos en este estudio se determina por la proporción de las especies registradas.

4.2 Parámetros ecológicos, índice de valor de importancia y volumen fustal

El número de árboles por ha es mayor en el área con tratamiento de aclareos. Graciano et al. (2017) y López-Hernández et al. (2017), mencionan que una alta abundancia de especies y una baja frecuencia es característica de un ecosistemas con estructura heterogénea, generada por el manejo de bosques irregulares, lo que daría como resultado las áreas operadas mediante MMOBI. La mayoría de los bosques naturales son generados por árboles de distintas clases de edad, además de que su distribución y tamaño no se considera uniforme (Gadow et al., 2007), mientras que, un alto porcentaje de bosques está formado por diferentes estratos en donde se distinguen diferentes dominancias de árboles de formas, tamaños y mezcla de especies, y cuya distribución y tamaño dependen, entre otras cosas, del ritmo de crecimiento y de su tolerancia a la sombra (López-Hernández et al., 2017), característica estructural de áreas operadas con MDS, lo que consecuentemente generaría un bosque regular.

Los cambios de área basal entre periodos de evaluación no difieren estadísticamente para cada tratamiento; sin embargo, la superficie manejada mediante aclareos muestra un incremento mayor de área basal en el periodo de 10 años, este incremento se debe a la apertura del dosel, y eliminar la competencia dando origen a un crecimiento mayormente acelerado de los árboles restantes en las categorías diamétricas menores.

Pinus y *Quercus* fueron los de mayor frecuencia para ambos tratamientos, estos géneros han sido reportados con los valores más altos de frecuencia relativa por diferentes autores en estudios realizados para bosques templados en México (Graciano-Ávila et al., 2020; Hernández-Salas et al., 2013; López-Hernández et al., 2017; Monarrez-Gonzalez et al., 2020; Rendón-Pérez et al., 2021; Santiago-Ramírez et al., 2019; Silva-García et al., 2021).

P. durangensis, *Q. sideroxyla* y *P. cooperi* resultaron ser las especies de mayor valor ecológico, de acuerdo con el valor porcentual del índice de valor de importancia, diversos autores han reportado al menos una de estas especies como las de mayor representatividad para el estado de Durango (Delgado-Zamora et al., 2016; Graciano-Ávila et al., 2020; Graciano et al., 2017; Guevara-Fisher et al., 2021; Monarrez-Gonzalez et al., 2020; Silva-García et al., 2021).

El sitio 6 intervenido 7 años después del inventario 1, presentó un decremento en área basal y volumen fustal, pero no en el número de árboles, mientras el sitio 9 intervenido un año después del inventario 1, presentó un decremento en el número de árboles y volumen fustal pero un aumento en área basal, Hernández-Salas et al. (2018), al evaluar la dinámica de crecimiento de un bosque templado bajo manejo en Chihuahua, México, de 46 parcelas circulares de 0.1 ha, establecidas en 1986 para posteriormente ser intervenidas silvícolamente un año después de su instalación y ser remedidas en 1996 y 2006, antes de una nueva intervención silvícola, menciona que los valores de área basal y volumen previos a la corta; en las remediciones se ven afectados por el aprovechamiento y la regeneración, por lo que las diferencias entre evaluaciones no siempre son incrementos; en ocasiones decrecen, por lo que no es posible determinar el rendimiento neto de la masa arbórea. En este estudio para los doce sitios evaluados el número de árboles algunas veces no se recuperó, pero si el área basal o volumen fustal, independientemente del año de corta y tratamiento silvícola aplicado, por lo que existe una productividad alta en la recuperación de la masa arbolada mediante al área basal o volumen fustal de los bosques bajo aprovechamiento del estado de Durango.

CAPÍTULO II

**PATRONES DE ESTRUCTURA Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL EN
BOSQUES TEMPLADOS BAJO MANEJO FORESTAL EN EL
NOROESTE DE MÉXICO**

**PATTERNS OF STRUCTURE AND SPATIAL DISTRIBUTION IN
TEMPERATE FORESTS UNDER FOREST MANAGEMENT IN
NORTHWEST MEXICO**

CAPÍTULO II. PATRONES DE ESTRUCTURA Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL EN BOSQUES TEMPLADOS BAJO MANEJO FORESTAL EN EL NOROESTE DE MÉXICO

Resumen

En este estudio se analizó la estructura y distribución espacial de catorce sitios permanentes de investigación forestal y de suelos bajo manejo forestal, utilizando patrones de puntos a nivel vecindad para conocer mezcla de especies, distribución espacial y diferenciación dimensional, además de un patrón de análisis de puntos mediante la función K de Ripley. En sitios cuadrangulares de 2500 m² intervenidos con tratamientos silvícolas de selección, primer y segundo aclareo se registró la especie, el diámetro normal, la altura total, el azimut y la distancia de cada uno de los arboles al centro del sitio en un intervalo de diez años, la extracción forestal difiere para cada sitio. Los resultados indican cambios en los valores promedios de mezcla de especies para cada sitio, algunos sitios presentaron cambios en su distribución espacial mediante el índice de uniformidad de Gadow y el índice de información direccional de Corral-Rivas, además de cambios en la clasificación de dimensiones indicados con el índice de diferenciación para diámetro y altura, y el índice de dominancia, finalmente, la función K de Ripley presentó cambios en algunos sitios, indicando que la aplicación de algunos tratamientos silvícolas modifican la distribución espacial del arbolado a diferentes escalas.

Palabras clave: diferenciación dimensional; distribución espacial; estructura; mezcla de especies; patrón de puntos.

Abstract

In this study, the structure and spatial distribution of fourteen permanent forest and soil research sites under forest management were analyzed, using point patterns at the neighborhood level to determine the mixture of species, spatial distribution and dimensional differentiation, in addition to a pattern analysis of points using Ripley's K function. In quadrangular sites of 2500 m² intervened with selection silvicultural treatments, first and second thinning, the species, normal diameter, total height, azimuth and distance of each of the trees from the center of the site were recorded

in an interval of ten years, forest extraction differs for each site. The results indicate changes in the average values of species mixture for each site, some sites presented changes in their spatial distribution through the Gadow uniformity index and the Corral-Rivas directional information index, in addition to changes in the classification of dimensions . indicated with the differentiation index for diameter and height, and the dominance index, finally, Ripley's K function presented changes in some sites, indicating that the application of some silvicultural treatments modifies the spatial distribution of trees at different scales.

Key words: dimensional differentiation; space distribution; structure; mix of species; dot pattern.

1. Introducción

En el manejo forestal sustentable la correcta gestión de los recursos forestales de los bosques y terrenos forestales aseguran la permanencia de los procesos y funciones del bosque de una manera óptima, y aseguran la conservación de la diversidad biológica, la productividad, la capacidad de regeneración, la vitalidad y capacidad de cumplir funciones de carácter económico, ecológico y social, en el presente y en el futuro a una escala local, nacional e internacional, sin dañar a otros ecosistemas (Aguirre-Calderón, 2015; Manzanilla-Quijada et al., 2020; Soto-Cervantes et al., 2021).

La estructura forestal es definida por los patrones y las interacciones de sus atributos en los que se incluyen el tipo, el tamaño, la forma, y la distribución vertical y horizontal de los árboles, además de otras características morfológicas y demográficas del paisaje (Wehenkel et al., 2015). Se considera a la estructura del estrato arbóreo un indicador de la biodiversidad, la cual se puede modificar a través del manejo forestal mediante la aplicación de prácticas silvícolas (Corral-Rivas et al., 2005; López-Hernández et al., 2017; Silva-González et al., 2022; Solís-Moreno et al., 2006). Los cambios que se generan mediante la aplicación de los diferentes tratamientos silvícolas sobre la diversidad y estructura del arbolado, se determinan por su intensidad y frecuencia; aunado a la etapa de desarrollo silvícola de la masa arbórea, por lo que, la conservación de la diversidad arbórea es una condición manipulable mediante el manejo forestal, manteniendo la productividad de estos bosques (Monarrez-Gonzalez et al., 2020; Silva-González et al., 2022).

La importancia de precisar las estructuras espaciales forestales y sus modificaciones debidas a la extracción forestal, especialmente en bosques incoetáneos y mezclados, requiere de índices estadísticos que describan significativamente la estructura espacial (Castellanos-Bolaños et al., 2010; Corral-Rivas et al., 2010), por lo que el objetivo de la presente investigación fue evaluar los patrones de estructura y distribución espacial mediante el análisis de catorce sitios permanentes intervenidos mediante los métodos silvícolas de selección y aclareos.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

En el área de estudio se evaluaron 14 Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos (SPIFyS) instalados y remedidos en un intervalo de 10 años, localizados en cinco ejidos bajo manejo forestal en el Municipio de Pueblo Nuevo en el estado de Durango, pertenecientes a la UMAFOR 1008, dentro del sistema montañoso denominado Sierra Madre Occidental (Figura 5).

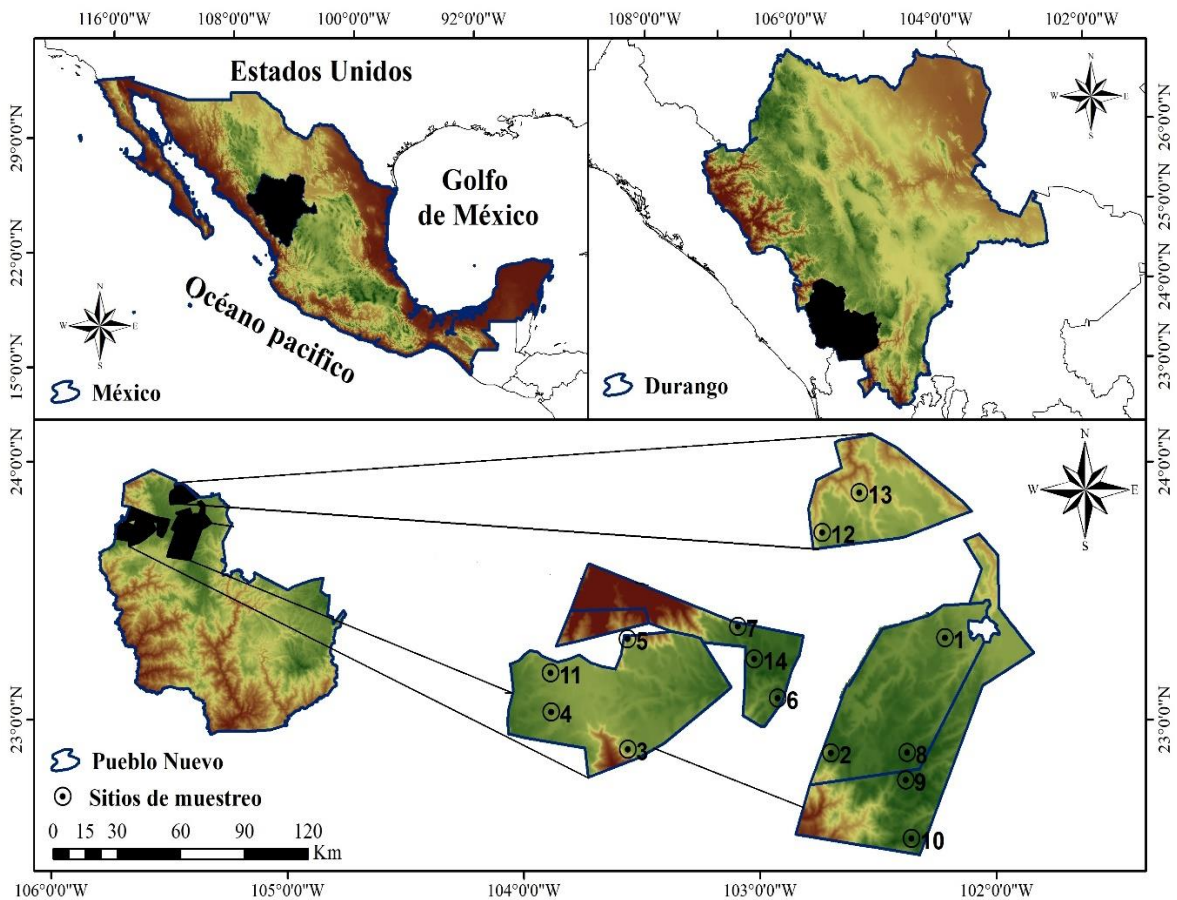


Figura 5. Ubicación del área de estudio y localización de los 14 sitios permanentes de investigación forestal y de suelos bajo manejo forestal en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.

Siete sitios fueron operados mediante el método silvícola MMOBI (Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares) bajo el tratamiento de selección y siete mediante MDS (Método de Desarrollo Silvícola), de los cuales, seis de ellos se

intervinieron mediante un primer aclareo y un sitio con un segundo aclareo, el año de aplicación del tratamiento silvícola difiere para cada sitio analizado (Cuadro 8).

Cuadro 8. Número de sitios evaluados, nombre del ejido al que pertenecen, tratamiento silvícola, año de instalación y año de corta para los catorce sitios analizados en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.

Sitio	Ejido	Tratamiento silvícola	Año de instalación	Año de corta
1	La Victoria	Selección	2007	2013
2	La Victoria	Selección	2007	2012
3	La Ciudad	Selección	2008	2009
4	La Ciudad	Selección	2008	2013
5	La Ciudad	Selección	2008	2015
6	La Campana	Selección	2008	2008
7	La Campana	Selección	2008	2015
8	La Victoria	Primer aclareo	2007	2012
9	El Brillante	Primer aclareo	2008	2009
10	El Brillante	Primer aclareo	2008	2009
11	La Ciudad	Primer aclareo	2008	2017
12	San Esteban	Primer aclareo	2008	2017
13	San Esteban	Primer aclareo	2008	2013
14	La Campana	Segundo aclareo	2008	2009

2.2 Análisis de la información

Dentro de los sitios se obtuvo para cada árbol el registro de su especie, el diámetro normal (cm), el cual se obtuvo con el promedio de dos mediciones con una forcípula forestal *Haglöf Mantax* 650 mm, la altura total (m) generada con un hipsómetro *Vertex IV Haglöf*, el azimut (°) obtenido con un clinómetro *Tandem Suunto*

360PC/360R y la distancia de cada árbol al centro del sitio (m). El tamaño de los sitios fue de 50 x 50 m.

2.3 Caracterización del patrón de análisis de puntos a nivel vecindad

Para caracterizar la diversidad espacial del arbolado mediante relación de vecindad se utilizó el método convencional de muestreo conocido como grupo estructural de los cinco árboles (Corral-Rivas et al., 2005; Silva-González et al., 2021; Solís-Moreno et al., 2006), para conocer mezcla de especies, distribución espacial y diferenciación de tamaños entre los árboles.

Mezcla de especies

Índice de mezcla de especies (M_i). Es una medida de la segregación espacial de los individuos de distintas especies, describe la variedad en la vecindad de un árbol central dado y se ha definido como la proporción de los n vecinos que pertenecen a diferente especie. El valor de este índice cambia entre 0 y 1. Utilizando cuatro vecinos se pueden asumir cinco diferentes valores (0.0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1), valores cercanos a cero indican que las especies se agrupan y no se mezclan entre ellas; por el contrario, valores cercanos a uno indican una mezcla de especies (Gadow et al., 2007; Gadow & Hui, 2002; Solís-Moreno et al., 2006):

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j \quad [5]$$

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 si es de diferente especie (Gadow et al., 2007; Mora-Donjuán et al., 2016).

Distribución espacial

Índice de uniformidad de Gadow (W_i). Describe que tan regular o irregular es la distribución espacial de la relación de vecindad del arbolado (Aguirre-Calderón, 2004; Gadow et al., 2007; Mora-Donjuán et al., 2016). Utiliza la medición de ángulos entre dos árboles vecinos al árbol centro i mediante su comparación con un ángulo estándar α . Sus valores varían entre 0 y 1, considerando cuatro vecinos respecto al árbol centro i sus valores pueden ser 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 y 1, con condiciones espaciales definidas como regular, poco regular, aleatoria, poco agrupada y agrupada, respectivamente (Silva-González et al., 2021):

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad [6]$$

donde $w_{ij} = 1$, si el ángulo j es menor al α , $w_{ij} = 0$, si es mayor.

Para este trabajo se utilizó un ángulo estándar de 72° debido a que, en las simulaciones de Hui & Gadow, (2002) se encontró a este valor como el ángulo estándar óptimo produciendo un promedio de $W=0.5$ para una distribución al azar del arbolado (Aguirre-Calderón et al., 2003; Corral-Rivas et al., 2005; Gadow & Hui, 2002; Silva-González et al., 2021; Solís-Moreno et al., 2006).

Índice de información direccional media de Corral-Rivas (R_i). Este índice es una variable generada para el análisis espacial del arbolado dentro de un área definida. Utiliza la información direccional emitida por un árbol centro i y sus n vecinos más cercanos. Esta variable se relaciona con las ideas de estadística direccional y por lo tanto requiere la precisión de la medición de ángulos, sin embargo, no utiliza la medición de distancias entre árboles (Corral-Rivas et al., 2010; Luján-soto et al., 2008; Solís-Moreno et al., 2006; Wehenkel et al., 2015). La interpretación de este índice es de la siguiente manera: $R_{i\text{-regular}} < R_{i\text{-aleatoria}} < R_{i\text{-agrupada}}$. Su expresión matemática se define a continuación:

$$R_i = \sqrt{1 + \left(\sum_{j=2}^n \cos(\alpha_{ij})\right)^2 + \left(\sum_{j=2}^n \sin(\alpha_{ij})\right)^2} \quad [7]$$

donde: α_{ij} = son los ángulos iniciando en el árbol centro i y apuntando al j -ésimo árbol vecino con la orientación de las manecillas del reloj. El valor de 1 se registra en la fórmula debido a que las direcciones de los j -ésimos árboles son tomadas a partir del árbol centro i , por lo que solamente se requiere la medición de los tres primeros ángulos para la estimación de esta variable.

El valor exacto para un rodal con distribución de árboles aleatoria es de 1.8 (más precisamente 1.799). Este valor fue generado mediante la simulación de 10^6 árboles y se encuentra muy cercano a una aproximación realizada para la dirección media $E(R)$ de n vectores, apuntando desde un punto de referencia i a n puntos al azar, dada por la ecuación 8 (Upton & Fingleton, 1989):

$$E(R_i) = \frac{1}{2} \sqrt{n * \pi} \quad [8]$$

para $n = 4$ la aproximación de la fórmula 8 arrojó un valor de 1.77, mientras que el valor exacto es de 1.799 (Corral-Rivas et al., 2010; Luján-soto et al., 2008; Solís-Moreno et al., 2006; Wehenkel et al., 2015).

Diferenciación dimensional

El grado de la diferenciación dimensional constituye una manera para describir la proximidad espacial que existe entre árboles de diferentes tamaños en el bosque. Una forma de medir esta diferenciación es con los índices denominados diferenciación dimensional e índice de dominancia (Gadow et al., 2007).

Índice de diferenciación dimensional (T_i). Es un índice que se puede utilizar con cualquier variable que represente el tamaño del árbol (Gadow et al., 2007), para este estudio diámetros y alturas. Toma en cuenta los n árboles más cercanos al árbol centro i y se describe a continuación:

$$T_i = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\min(Dim_i, Dim_j)}{\max(Dim_i, Dim_j)} \quad [9]$$

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

El valor de estos índices se incrementa al aumentar la diferencia media del tamaño de los árboles cercanos al árbol de referencia i ($0 \leq T_i \leq 1$). 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). En este trabajo se integraron cinco grupos de diferenciación dimensional de acuerdo con las siguientes categorías: 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 (Mora-Donjuán et al., 2016; Rubio-Camacho et al., 2017).

Índice de dominancia (U_i). También denominado media del entorno, puesto que describe la dominancia relativa de una especie en su entorno directo. Se define como la proporción de los n vecinos más próximos al árbol centro i que son más pequeños que dicho árbol, al igual que el índice de diferenciación se puede comparar en diámetro y/o altura, para este estudio se utilizó el diámetro normal de las especies (Aguirre-Calderón et al., 2003; Gadow et al., 2007; Rubio-Camacho et al., 2017):

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j \quad [10]$$

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.

Utilizando cuatro vecinos sus resultados se describen a continuación: $U_i=0$ si los cuatro vecinos son más grandes que el árbol de referencia i (suprimido); $U_i = 0.25$ si tres de los vecinos son más grandes que el árbol de referencia i (intermedio); $U_i = 0.50$ si dos de los vecinos son más grandes que el árbol de referencia i (codominante); $U_i = 0.75$ si uno de los vecinos es más grande que el árbol de referencia i (dominante) y $U_i = 1$ si ninguno de los vecinos es más grande que el árbol de referencia i (muy dominante) (Mora-Donjuán et al., 2016; Silva-González et al., 2021).

2.4 Caracterización del patrón de análisis de puntos

Distribución espacial del arbolado. Se aplicó la función $K(r)$ de Ripley, una de las herramientas más utilizadas para caracterizar patrones de puntos (ecuación 11) (De la Cruz, 2013). Permite conocer, de manera gráfica, el tipo de distribución de los árboles en los sitios a diferentes distancias o escalas. La función $K(r)$ representa la esperanza del número de árboles que están a una distancia igual o menor que r y el número de árboles que existen en un círculo de radio variable (r) alrededor de un determinado árbol. La función empírica obtenida a partir de los datos reales de los sitios, se comparó con la generada en sitios simulados mediante un proceso aleatorio; de esta forma se determinaron las tipologías de las estructuras presentes en todos los sitios a diferentes escalas:

$$K(r) = \frac{A}{n(n-1)} \sum_{i=j}^n \sum_{i \neq j}^n l_{ij}(r) w_{ij}(r) \quad [11]$$

Donde:

A = Área de estudio

n = Número de puntos en el área de estudio

l_{ij} = Distancia entre el i -ésimo y j -ésimo árbol

w_{ij} = Factor de corrección del efecto borde para los puntos i - j

(Diggle, 1983) en la discusión del artículo de Ripley (1977) propone usar la raíz cuadrada de la función $K(r)$, debido a que se estabilizan las varianzas y se facilita la interpretación (ecuación 12). La siguiente transformación tiene una media (μ) cero y una varianza (σ) aproximadamente constante, cuando la distribución del arbolado es al azar:

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r \quad [12]$$

En un sitio con una distribución al azar, $L(r)$ es igual a cero a cualquier distancia sí, a $L(r)$ le corresponde un valor negativo (es menor que el valor esperado para una distribución aleatoria), los árboles están relativamente alejados entre ellos; lo que sugiere regularidad o inhibición. Por el contrario, valores positivos de $L(r)$ (mayor que el valor esperado para una distribución aleatoria) indican que los árboles están agrupados o que existe cierta atracción entre ellos. Por tanto, la función $L(r)$ se empleó en el presente trabajo para caracterizar el tipo de patrón de puntos de los sitios permanentes como una función de la escala.

2.5 Estimación de los índices y corrección del efecto de borde

La estimación de los índices del patrón de puntos a nivel vecindad utilizados en este trabajo se analizaron mediante diferentes programas desarrollados en el sistema SAS (Statistical Analysis System Institute (SAS), 2009). Para el análisis del patrón de puntos se utilizó el *software* estadístico *R Studio*® (RStudio Team, 2015), mediante las librerías *ggplot2* y *spatstat* (Baddeley & Turner, 2005).

El cálculo de los índices de vecindad estudiados siempre estará sesgado a los árboles cercanos a los bordes de los sitios a menos que se utilice un método de corrección de borde. Los árboles cercanos a los bordes de los sitios suelen ser problemáticos porque sus vecinos potenciales pueden estar localizados fuera del área de estudio. Para corregir el efecto de borde en los índices de vecindad y obtener resultados insesgados, se aplicó un método de corrección de borde del n vecino más cercano (*nearest neighbour edge corection method*) propuesto por Pommerening & Stoyan, (2006), en las rutinas de SAS. La determinación de esta técnica de corrección de borde permite obtener estimaciones insesgadas para los valores medios de los índices, así como las verdaderas distribuciones de sus valores. Basado en el concepto de “*minus sampling*” (reducción del número de árboles de referencia), que evalúa si todos los n vecinos más cercanos al árbol de referencia i se encuentran localizados dentro del sitio, eliminando aquellos individuos que se encuentran muy cercanos a los límites del área estudiada. Debido a que los cuatro vecinos más cercanos a un árbol de referencia i se enumeran en orden ascendente de acuerdo a su distancia, se ignoraron todos los árboles de

referencia en la que su distancia media al cuarto árbol es más grande que la distancia al borde más cercano.

3. Resultados

De manera general se registraron 21 especies, distribuidas en seis géneros y seis familias, el género *Pinus* fue el de mayor representatividad con seis especies, seguido de *Arbutus* y *Quercus* con cinco especies, *Alnus* y *Juniperus* representaron dos especies, mientras que, *Prunus* registró solo una especie (Cuadro 9).

Cuadro 9. Nombre de la especie, nombre común y familia registrados en ambos inventarios dentro de los sitios permanentes bajo manejo forestal en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.

Especie	Nombre común	Familia
<i>Alnus firmifolia</i> Fernald	Aliso	Betulaceae
<i>Alnus jorullensis</i> Kunth	Aliso	Betulaceae
<i>Arbutus arizonica</i> (A. Gray) Sarg.	Madroño liso	Ericaceae
<i>Arbutus bicolor</i> S. González, M. González & P.D. Sørensen	Madroño	Ericaceae
<i>Arbutus madrensis</i> S. González	Madroño roñoso	Ericaceae
<i>Arbutus tessellata</i> P.D Sørensen	Madroño pegajoso	Ericaceae
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	Madroño	Ericaceae
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	Táscate	Cupressaceae
<i>Juniperus durangensis</i> Martínez	Táscate	Cupressaceae
<i>Pinus cooperi</i> C. E. Blanco	Pino chino	Pinaceae
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	Ocote	Pinaceae
<i>Pinus herrerae</i> Martínez	Ocote	Pinaceae
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltdl & Cham.	Pino prieto	Pinaceae
<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.	Pino blanco	Pinaceae
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	Pino colorado	Pinaceae
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	Capulín	Rosaceae
<i>Quercus arizonica</i> Sarg.	Encino	Fagaceae
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	Encino prieto	Fagaceae
<i>Quercus obtusata</i> Bonpl.	Encino roble	Fagaceae
<i>Quercus rugosa</i> Née	Encino blanco	Fagaceae
<i>Quercus sideroxyla</i> Bonpl.	Encino colorado	Fagaceae

El cuadro 10 presenta los valores dasométricos de los sitios permanentes bajo manejo forestal evaluados en ambos inventarios. Se presenta para cada sitio y periodo de evaluación (T1 y T2) su densidad, obtenida con el número de árboles por hectárea ($N \text{ ha}^{-1}$); área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$); diámetro medio (Dm) (cm), obtenido con el promedio de los diámetros normales para cada sitio; altura media (Hm) (m), obtenida con la altura promedio para cada sitio; diámetro cuadrático (Dg) (cm), obtenido con la raíz cuadrada del área basal por hectárea multiplicado por el factor 4, y dividido entre la densidad o el número de árboles por hectárea multiplicado por el valor de pi (π), para finalmente multiplicar el resultado por 100; altura máxima (Ho) (m), obtenida con el promedio de los cinco árboles de mayor altura para cada sitio (Diéguez-Aranda et al., 2009.; Hernández-Salas et al., 2018) y el volumen por hectárea ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), obtenido con ecuaciones generadas para cada especie por el sistema biométrico forestal para la UMAFOR 1008, con excepción de *Arbutus spp*, para la que se utilizaron las ecuaciones generadas por Cruz-Cobos et al. (2016).

Cuadro 10. Características dasométricas de los sitios permanentes de investigación forestal y de suelos bajo manejo en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.

Sitio	$N \text{ ha}^{-1}$		$AB \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$		Dm (cm)		Hm (m)		Dg (cm)		Ho (m)		$Vol \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
1	636	764	21.13	22.01	17.8	16.9	10.6	16.9	20.6	19.2	22.34	25.2	173.61	182.20
2	228	260	21.23	23.66	31.7	28.9	17.0	28.9	34.4	34.0	24.4	29.38	200.29	240.47
3	296	276	25.22	28.05	31.7	34	22.8	34.0	32.9	36.0	27.42	31.08	321.35	376.95
4	572	560	23.09	27.21	19.6	22	13.6	22.0	22.7	24.9	25.22	25.66	216.55	265.70
5	796	604	35.77	31.32	20.5	22.5	15.3	22.5	23.9	25.7	26.12	27.92	349.07	314.48
6	432	420	22.49	24.91	22.1	23	12.4	23.0	25.7	27.5	23.08	24.32	191.20	216.86
7	368	416	24.12	23.74	25.6	23.9	16.4	23.9	28.9	27.0	24.92	24.96	244.01	240.32
8	988	1056	21.60	28.66	15.4	17	9.5	17.0	16.7	18.6	19.51	23.04	136.62	246.43
9	1076	1068	17.40	31.25	13.4	17.9	8.3	17.9	14.3	19.3	16.16	21.26	95.69	258.69
10	960	868	22.09	23.54	13.7	17.2	10.6	17.2	17.1	18.6	27.26	22.42	210.49	195.86
11	1112	976	26.12	29.21	14.2	16.4	13.2	16.4	17.3	19.5	27.98	29.12	264.96	320.90
12	684	616	17.06	18.72	15.4	16.9	10.8	16.9	17.8	19.7	19.04	19.88	112.83	130.02
13	952	888	17.54	19.74	13.8	15.3	8.1	15.3	15.3	16.8	16.06	16.7	83.30	102.89
14	668	528	30.80	30.55	22	24.2	15.1	24.2	24.2	27.1	23.06	24.52	295.16	308.66

Donde: N ha⁻¹: número de árboles por hectárea; AB m² ha⁻¹: área basal por hectárea; Dm (cm): diámetro medio aritmético; Hm (m): altura media; Dg (cm): diámetro cuadrático (cm); Ho: altura máxima (m); Vol m³ ha⁻¹: volumen por hectárea.

El cuadro 11 presenta el número de especies e individuos registrados en cada sitio y periodo de evaluación y una relación de la cantidad de individuos muertos en pie (N_Do7), muertos caídos (N_Do8), extraídos o tocones (N_ext) e incorporaciones (N_inc) en el segundo inventario. El sitio 5 presentó el mayor número de especies en ambos periodos, mientras que, el sitio 4 presentó el menor número de especies con 4, en ambos periodos.

Cuadro 11. Relación del registro de árboles en tiempo 1 y 2, muertos en pie, muertos caídos, árboles extraídos y árboles incorporados registrados en los sitios permanentes bajo manejo en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.

Sitio	S1	S2	N_T1	N_Do7	N_Do8	N_ext	N_inc	N_T2
1	8	10	159	1	0	20	53	191
2	7	7	57	0	0	12	20	65
3	5	7	74	0	2	10	7	69
4	5	5	143	0	1	11	9	140
5	12	10	199	1	27	22	2	151
6	8	8	108	2	3	16	18	105
7	7	9	92	0	1	10	23	104
8	7	8	247	2	4	16	39	264
9	4	4	270	0	5	32	34	267
10	5	4	240	0	0	92	69	217
11	6	6	278	0	9	51	26	244
12	9	9	171	1	12	17	13	154
13	9	9	238	0	5	31	20	222
14	7	7	167	0	0	36	4	132

Donde: S1: especies en el primer inventario; S2: especies en el segundo inventario; N_T1: árboles por sitio en tiempo 1; N_Do7: árboles registrados muertos en pie; N_Do8: árboles registrados muertos caídos; N_ext: árboles extraídos o tocones; N_inc: árboles incorporados; N_T2: árboles por sitio en tiempo 2.

El cuadro 12 presenta una relación de las cantidades de volumen por sitio, donde se observa el volumen en el primer inventario (Vol_T1), al cual se le resta el volumen de individuos registrados muertos en pie (Vol_Do7), muertos caídos (Vol_Do8) y extraídos (Vol_ext), para posteriormente sumarle el volumen de los arboles incorporados (Vol_inc), además se muestra el volumen que incremento el resto de la masa arbolada en el periodo de 10 años (Vol_IC), dando como resultado el volumen en el segundo inventario (Vol_T2).

Cuadro 12. Relación del registro de volumen de los sitios permanentes bajo manejo en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.

Sitio	Vol_T1 m ³ ha ⁻¹	Vol_Do7 m ³ ha ⁻¹	Vol_Do8 m ³ ha ⁻¹	Vol_ext m ³ ha ⁻¹	Vol_inc m ³ ha ⁻¹	Vol_T2 m ³ ha ⁻¹	Vol_IC m ³ ha ⁻¹
1	43.40	0.023	0.000	13.72	1.78	45.55	14.11
2	50.07	0.000	0.000	9.07	0.49	60.12	18.63
3	80.34	0.000	1.753	9.85	0.31	94.24	25.19
4	54.14	0.000	0.026	11.84	0.95	66.43	23.21
5	87.27	0.190	8.897	20.97	0.01	78.62	21.40
6	47.80	0.236	1.549	8.02	0.46	54.22	15.77
7	61.00	0.000	8.188	8.30	0.68	60.08	14.89
8	34.16	0.416	0.431	1.96	0.90	61.61	29.36
9	23.96	0.000	0.154	3.79	1.84	64.67	42.82
10	52.62	0.000	0.000	39.32	6.15	48.96	29.51
11	66.24	0.000	0.425	10.39	0.82	80.23	23.98
12	28.21	0.135	0.923	4.60	0.26	32.50	9.70
13	20.83	0.000	0.139	3.21	0.55	25.72	7.70
14	73.79	0.000	0.000	17.71	0.07	77.16	21.02

Donde: Vol_T1: volumen en el tiempo 1; Vol_Do7: volumen del arbolado muerto en pie; Vol_Do8: volumen del arbolado muerto caído; Vol_ext: volumen extraído; Vol_inc: volumen incorporado; Vol_T2: volumen en el tiempo 2; IC_vol: incremento de volumen del arbolado en el periodo de 10 años.

3.1 Caracterización del patrón de análisis a nivel vecindad

Mezcla de especies

El cuadro 13 presenta un resumen de los valores promedios de los índices de estructura evaluados a nivel vecindad, se puede observar que los valores de Mi difieren de un periodo de evaluación a otro; considerando las especies registradas (cuadro 11) y el tratamiento aplicado se modifican los valores medios de Mi . Por ejemplo, el sitio 6 operado bajo el tratamiento de selección, presentó 8 especies diferentes en ambos periodos de evaluación y valores de Mi de 0.70 y 0.72, para el tiempo 1 y 2, respectivamente, presentando un 36.99% y 42.03% de grupos estructurales en mezcla alta (0.75); el sitio 9 presentó 4 especies en ambos periodos de evaluación con valores de Mi de 0.10 y 0.13, con valores porcentuales de 78.54% y 73.83% de grupos estructurales sin mezcla (0.0), considerando una clara dominancia de alguna especie (operado con un primer aclareo); el sitio 14 presentó 7 especies diferentes en ambos inventarios, sus valores de Mi se redujeron 0.20% en el intervalo de 10 años y después de la aplicación del tratamiento silvícola de segundo aclareo, sus valores porcentuales en los cinco grupos estructurales se modificaron considerablemente.

Distribución espacial

De acuerdo con el trabajo de Hui & Gadow, (2002) quienes sugieren una distribución regular valores de $Wi < 0.470$, y aquellos valores de $Wi > 0.518$ distribuciones con tendencia a la formación de manchones o grupos, podemos observar que los sitios 2 y 7 se encuentran por debajo del límite para considerar una distribución aleatoria, por lo que, su distribución es considerada regular en ambos periodos de evaluación, los sitios 6 y 14 modifican su distribución de formación de grupos en tiempo 1 a una distribución aleatoria en tiempo 2, en cambio, los sitios 12 y 13 modificaron su distribución aleatoria a formación de grupos después de la aplicación del tratamiento silvícola, los sitios 1 y 4 presentaron un distribución con tendencia a la agrupación en ambos periodos de medición, los demás sitios presentan una distribución aleatoria antes y después de la aplicación del tratamiento silvícola.

De acuerdo con el índice de información direccional desarrollado por Corral-Rivas et al. (2010), la mayoría de los sitios presentaron una distribución aleatoria en ambos periodos de evaluación, ya que sus valores se encuentran dentro de los

valores críticos para distribuciones aleatorias (1.6-2.03) con un promedio de 100 árboles (González-Cueva et al., 2006). El sitio 3 presentó valores de $R_i= 1.55$ y $R_i= 1.54$, en tiempo 1 y 2, respectivamente, por lo que su distribución es considerada regular. El sitio 1 presento un valor de $R_i=2.09$ en el tiempo 2, valor considerado para una distribución agrupada de los árboles, que cambio de una distribución aleatoria ($R_i=1.95$) registrada en tiempo 1.

Diferenciación dimensional

En base a las categorías de clasificación, para diferenciación diamétrica se mantienen los atributos entre periodos de evaluación. La mayoría de los sitios presentaron clasificación fuerte (0.6-0.8), los sitios 3, 9 y 10 presentaron una clasificación de diferenciación clara (0.4-0.6), solamente el sitio 8 presentó cambios en su clasificación de clara a moderada del tiempo 1 a tiempo 2, respectivamente. Respecto a diferenciación en altura los sitios 1, 4, 5 y 6 presentaron clasificación fuerte, mientras que los sitios 7, 9, 11 y 12 clara. El sitio 2 cambio sus valores para pasar de una clasificación clara a fuerte, los sitios 3 y 8 cambiaron de moderada a clara, mientras que, el sitio 10 redujo su clasificación de clara a moderada y finalmente los sitios 13 y 14 cambiaron de fuerte a moderada después de la corta silvícola.

El índice de dominancia presentó valores para considerar a la mayoría de los grupos estructurales en el rol de árbol codominante, en ambos periodos de evaluación y para todos los sitios, puesto que al seleccionar un árbol al azar, dos de sus cuatro vecinos más cercanos serán menores en diámetro normal y dos serán mayores.

Cuadro 13. Valores de los índices de estructura evaluados para los 14 sitios bajo manejo en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango.

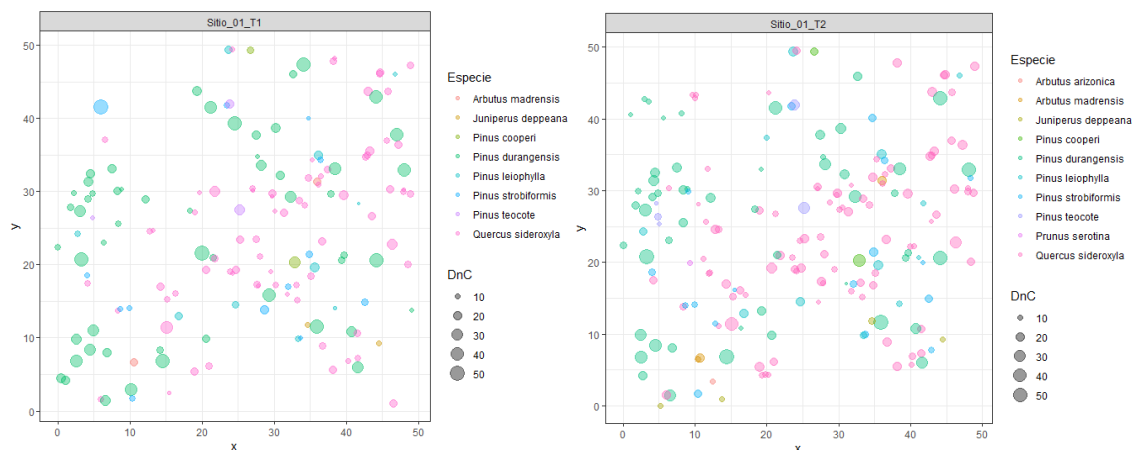
Sitio	Mi		Wi		Ri		TDi		THi		Ui	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
1	0.56	0.55	0.52	0.54	1.95	2.09	0.72	0.66	0.67	0.60	0.48	0.52
2	0.57	0.69	0.46	0.44	1.60	1.61	0.64	0.78	0.51	0.72	0.53	0.47
3	0.18	0.33	0.47	0.48	1.55	1.54	0.49	0.60	0.34	0.51	0.47	0.44
4	0.33	0.32	0.54	0.54	2.02	1.98	0.71	0.71	0.62	0.61	0.53	0.55
5	0.56	0.59	0.50	0.48	1.71	1.65	0.74	0.72	0.63	0.61	0.50	0.53
6	0.70	0.72	0.53	0.51	2.00	1.90	0.71	0.75	0.65	0.68	0.52	0.52

7	0.43	0.55	0.45	0.46	1.68	1.65	0.68	0.70	0.55	0.58	0.51	0.52
8	0.21	0.29	0.48	0.48	1.66	1.68	0.57	0.61	0.39	0.48	0.48	0.50
9	0.10	0.13	0.49	0.47	1.67	1.56	0.54	0.59	0.43	0.45	0.50	0.51
10	0.17	0.22	0.50	0.49	1.85	1.71	0.57	0.55	0.45	0.34	0.50	0.50
11	0.28	0.29	0.50	0.49	1.71	1.75	0.62	0.69	0.49	0.52	0.49	0.50
12	0.46	0.50	0.51	0.54	1.82	1.95	0.63	0.67	0.53	0.59	0.50	0.51
13	0.63	0.64	0.49	0.54	1.72	2.00	0.70	0.62	0.67	0.51	0.40	0.52
14	0.68	0.48	0.53	0.49	1.97	1.80	0.72	0.72	0.70	0.60	0.69	0.53

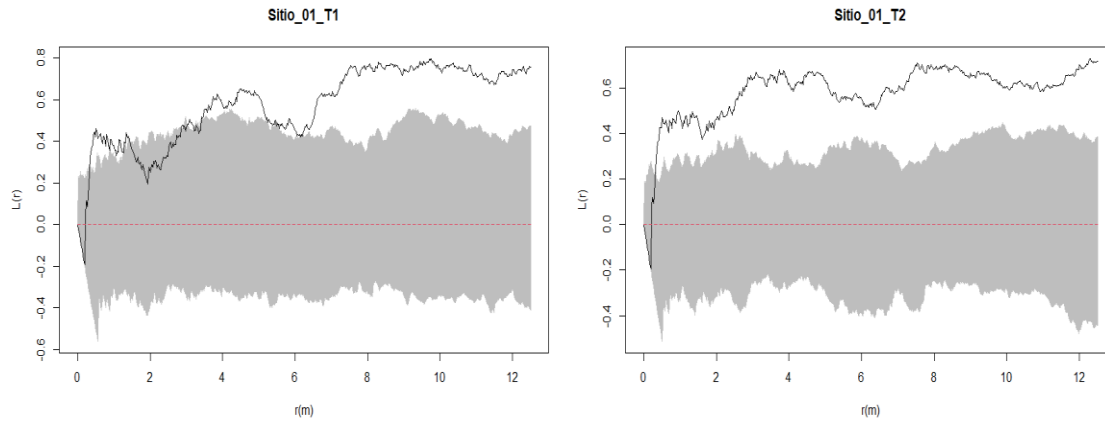
Donde: Mi : índice de mezcla de especies; Wi : índice de uniformidad de Gadow; Ri : índice de información direccional media de Corral-Rivas; TDi : índice de diferenciación en diámetro; THi : índice de diferenciación en altura Ui : índice de dominancia.

3.2 Caracterización del patrón de análisis de puntos

A continuación se presenta la distribución espacial observada de los árboles antes de la intervención silvícola y después de la aplicación de los tratamientos (a), así como la estimación de los valores de $L(r)$, en relación con el valor esperado de $L(r)$ para una distribución al azar del arbolado, a través del límite inferior y el límite superior, obtenido mediante 199 simulaciones aleatorias utilizando un 95 % de confiabilidad (b). La sombra gris del grafico corresponde al nivel de confianza para obtener una distribución completamente al azar del arbolado en función de la distancia, por lo que, valores por debajo del límite indican distribución regular, en cambio, valores por encima del límite indican distribución agrupada.



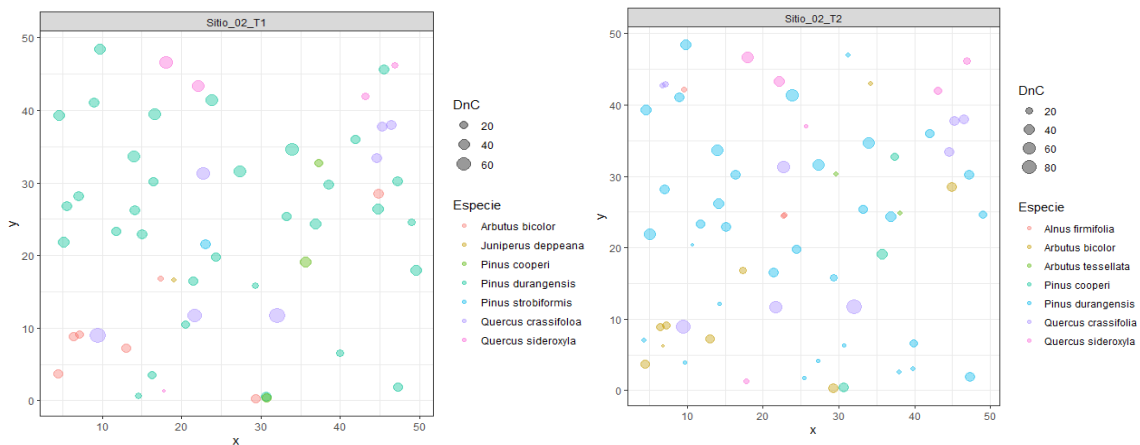
a) Distribución espacial observada para el sitio 1 en ambos periodos de evaluación.



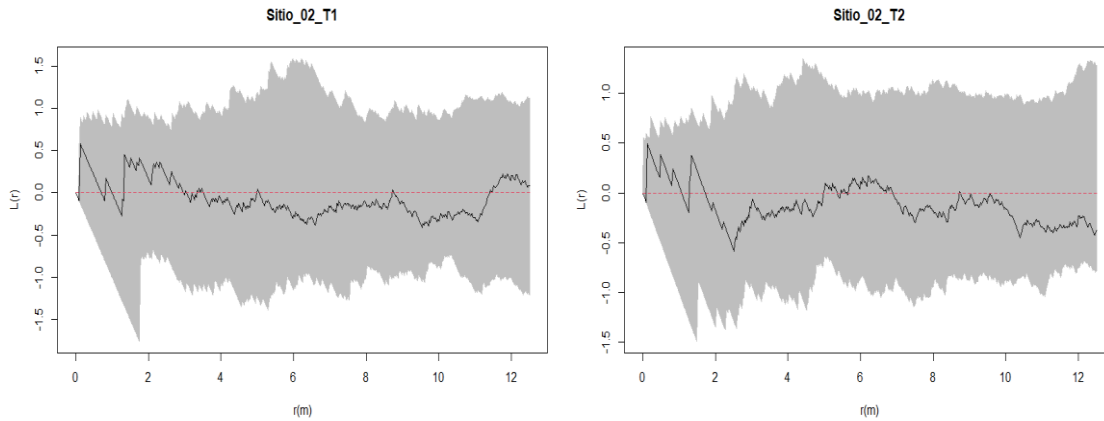
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 1 en ambos periodos de evaluación.

Antes de la aplicación del tratamiento silvícola se observa una distribución aleatoria del arbolado hasta los 4 metros de distancia, sin embargo, después de la corta la distribución tiende a formar grupos a partir del primer metro distante.

Figura 6. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 1 en tiempo 1 y tiempo 2.



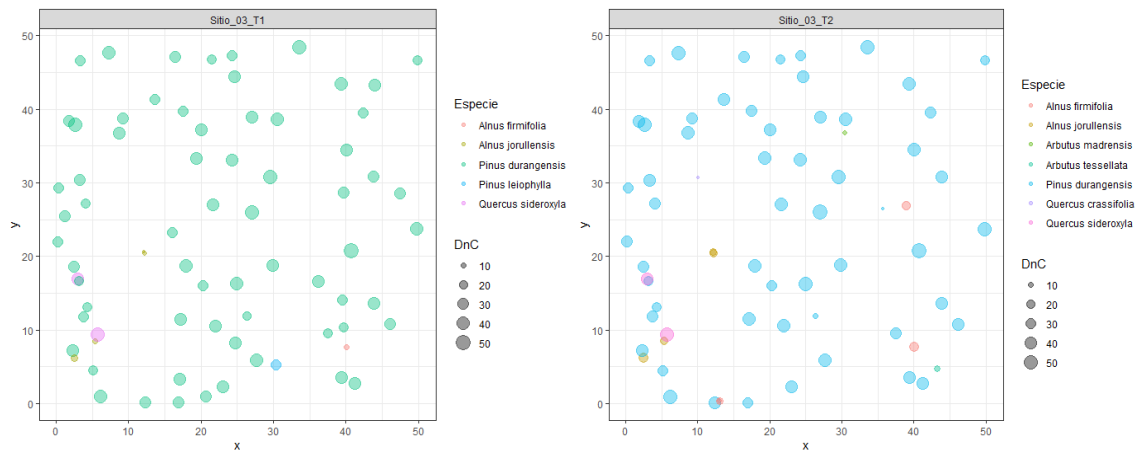
a) Distribución espacial observada para el sitio 2 en ambos periodos de evaluación.



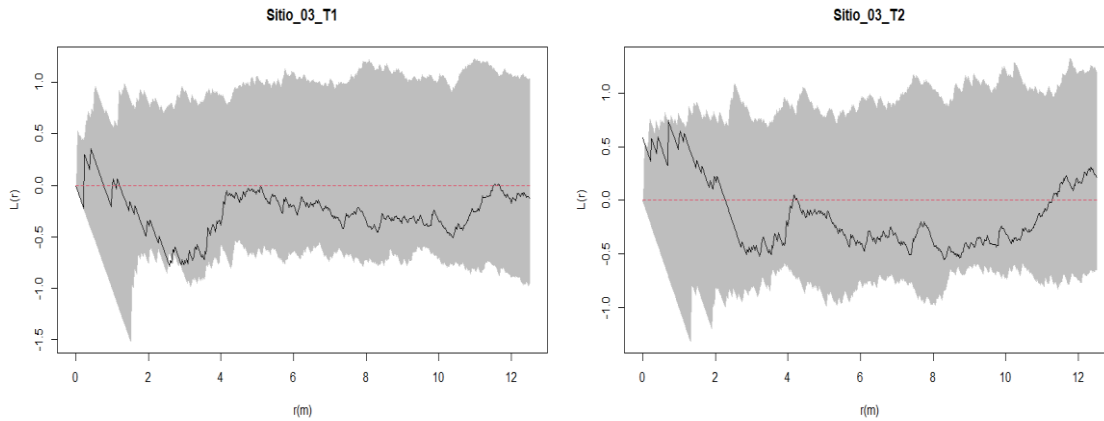
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 2 en ambos periodos de evaluación.

En ambos periodos de evaluación se mantiene una distribución completamente aleatoria, puesto que la línea de tendencia se mantiene entre los niveles de confiabilidad.

Figura 7. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 2 en tiempo 1 y tiempo 2.



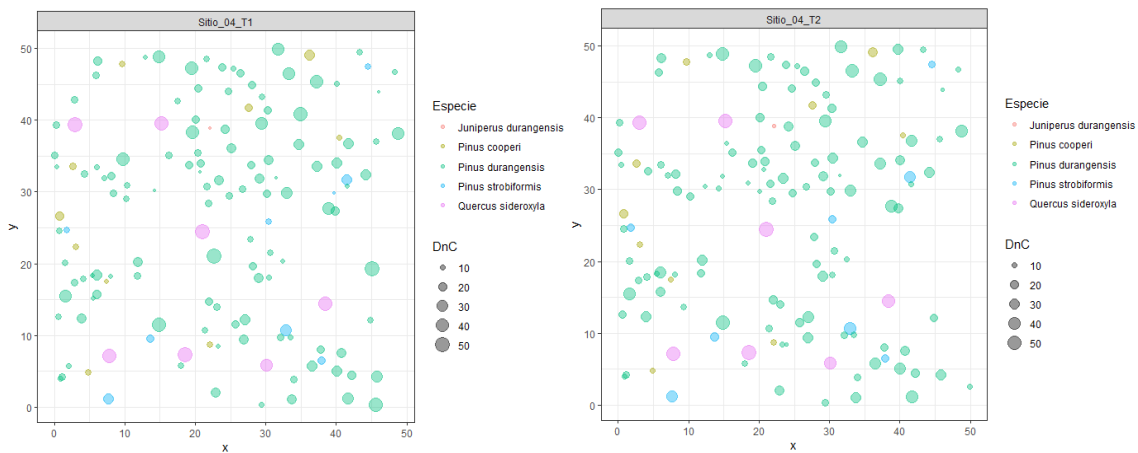
a) Distribución espacial observada para el sitio 3 en ambos periodos de evaluación.



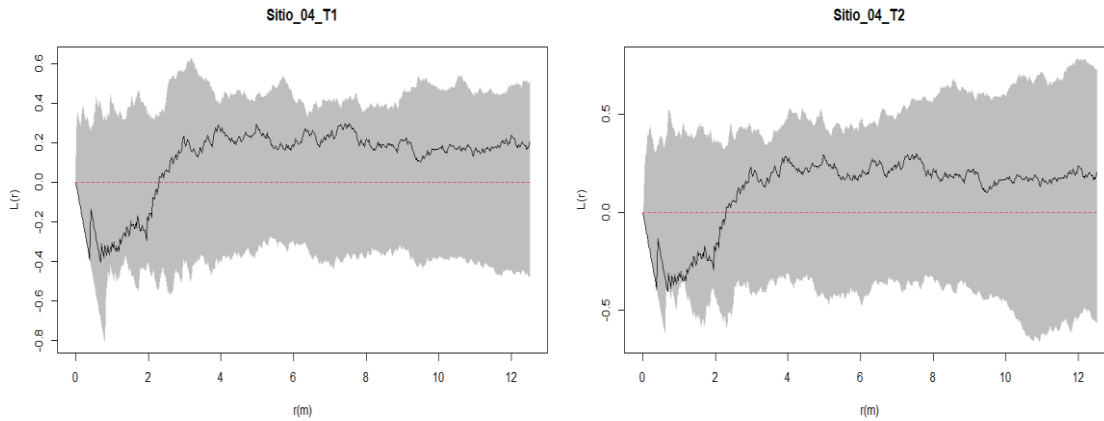
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 3 en ambos periodos de evaluación.

En ambos periodos de evaluación se mantiene una distribución al azar del arbolado, la línea de tendencia se mantiene entre los niveles de confiabilidad.

Figura 8. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 3 en tiempo 1 y tiempo 2.



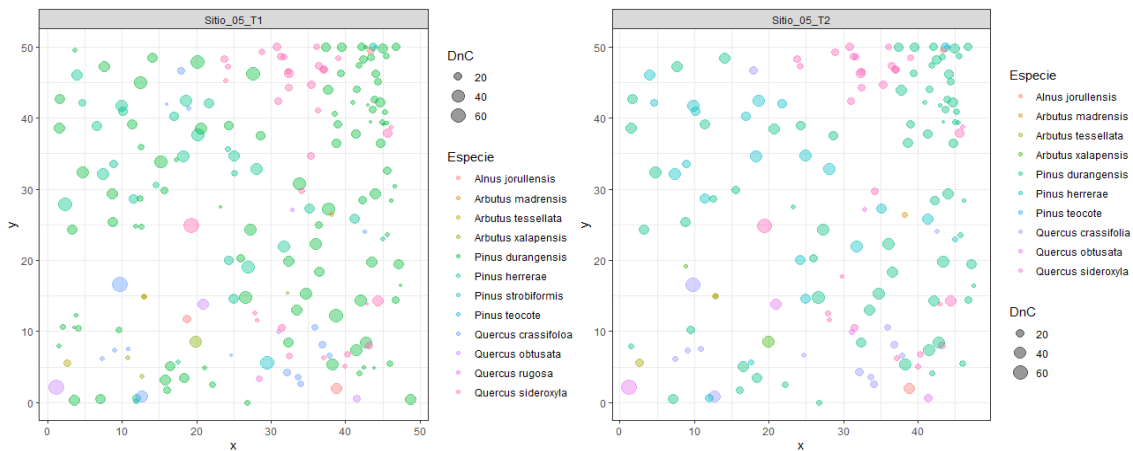
a) Distribución espacial observada para el sitio 4 en ambos periodos de evaluación



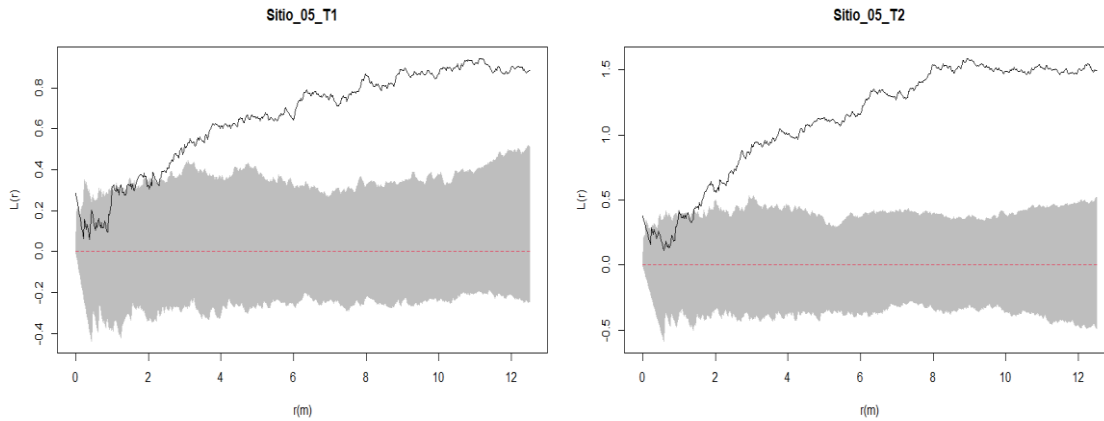
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 4 en ambos periodos de evaluación.

Se mantiene una distribución aleatoria del arbolado, antes y después de la corta silvícola.

Figura 9. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 4 en tiempo 1 y tiempo 2.



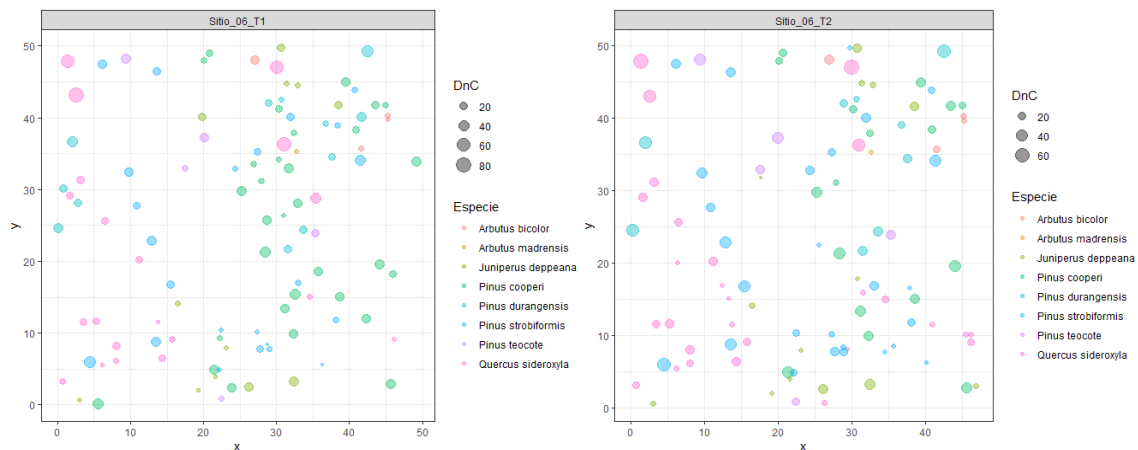
a) Distribución espacial observada para el sitio 5 en ambos periodos de evaluación



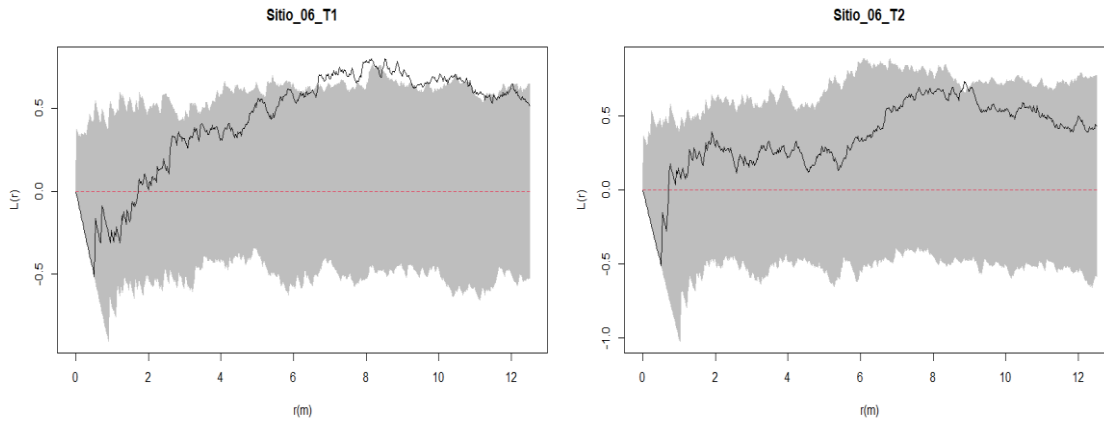
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 5 en ambos periodos de evaluación.

Se presenta una distribución aleatoria en los dos primeros metros distantes en ambos periodos de evaluación, sin embargo, la distribución se presenta en grupos después de esta marca. Además de incrementar los valores relativos de distribución en grupos una vez intervenido el sitio mediante la corta selectiva, de 0.8 [$L(r)$] en los 12 metros de distancia en el tiempo 1, hasta 1.5 [$L(r)$] en tiempo 2.

Figura 10. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 5 en tiempo 1 y tiempo 2.



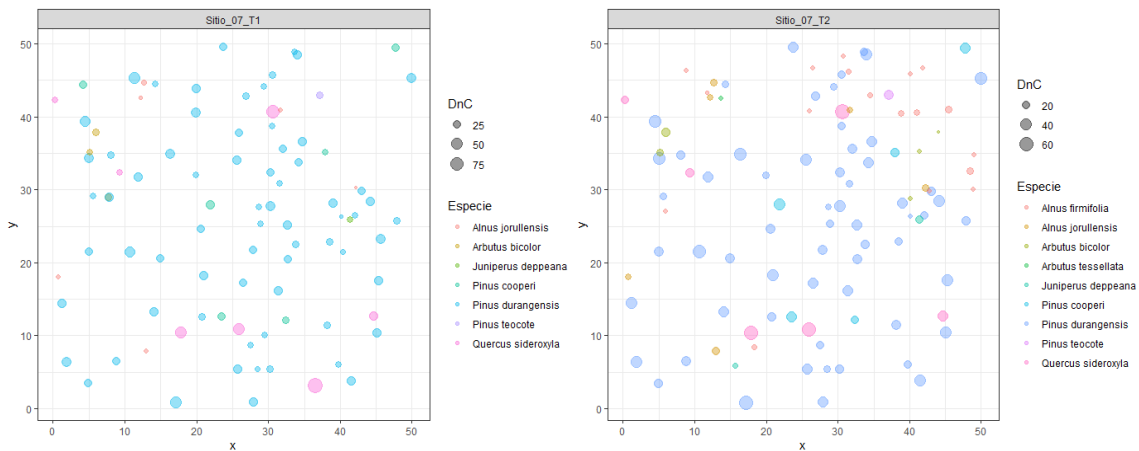
a) Distribución espacial observada para el sitio 6 en ambos periodos de evaluación



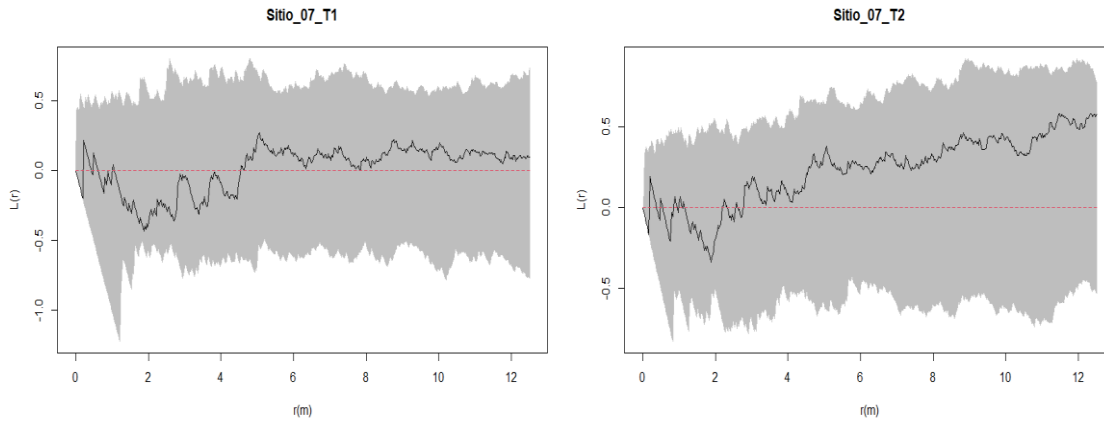
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 6 en ambos periodos de evaluación.

Los valores de tendencia se mantienen dentro de los límites para determinar una distribución aleatoria, antes y después de la intervención silvícola.

Figura 11. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 6 en tiempo 1 y tiempo 2.



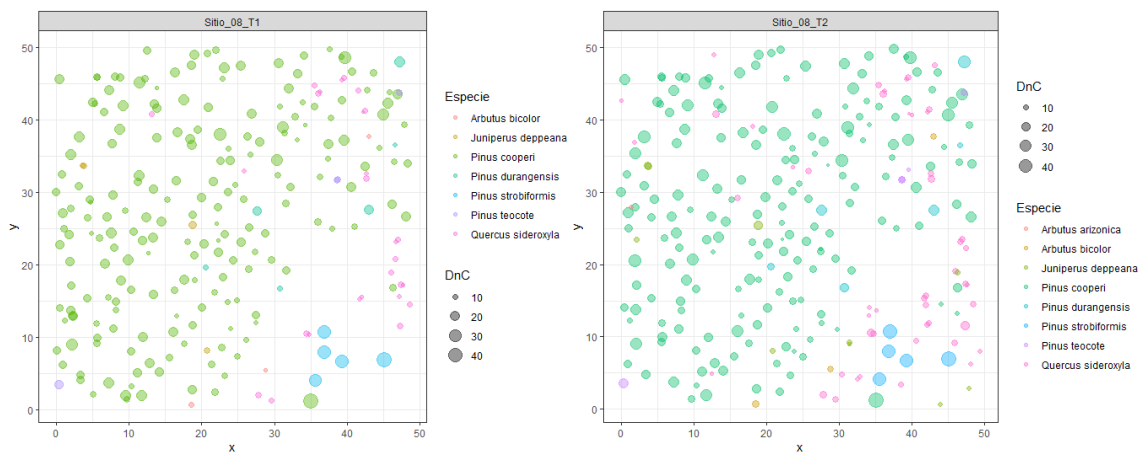
a) Distribución espacial observada para el sitio 7 en ambos periodos de evaluación



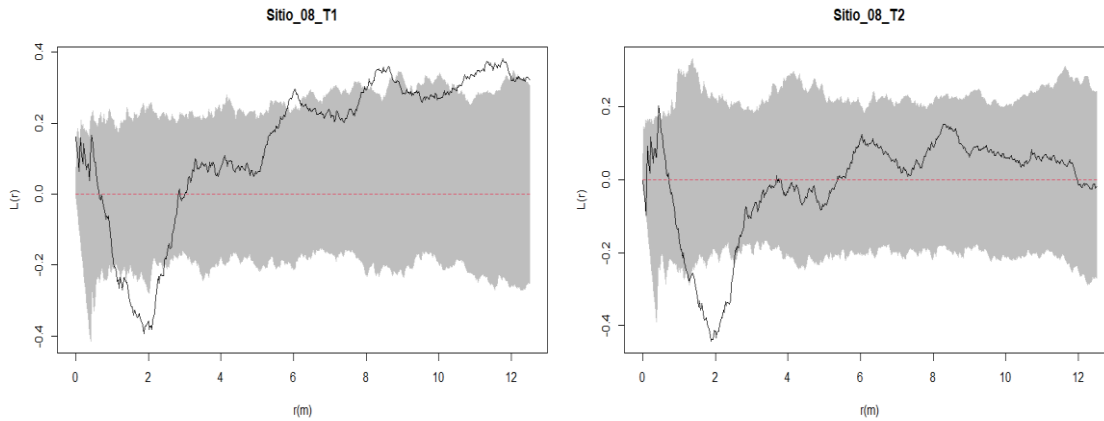
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 7 en ambos periodos de evaluación.

No se observan modificaciones de distribución, la tendencia se mantiene para determinar distribuciones aleatorias.

Figura 12. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 7 en tiempo 1 y tiempo 2.



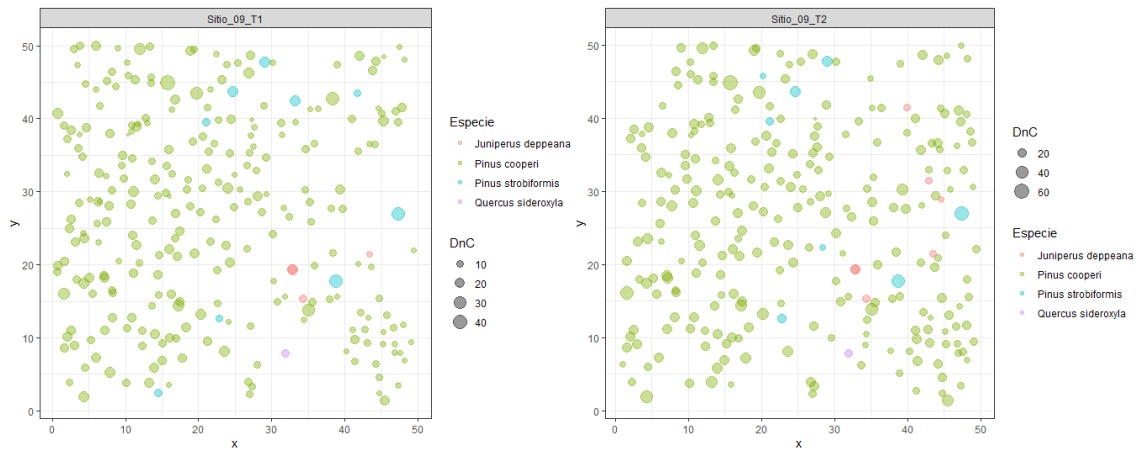
a) Distribución espacial observada para el sitio 8 en ambos periodos de evaluación



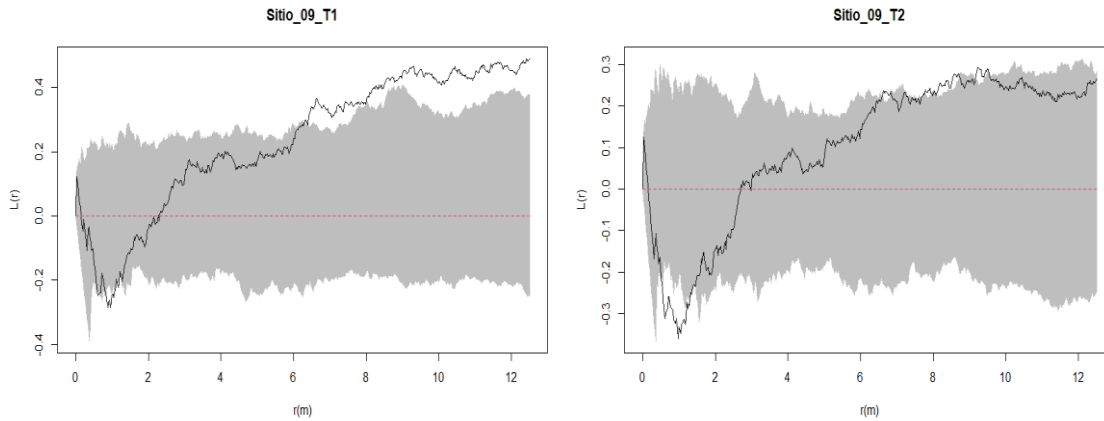
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 8 en ambos periodos de evaluación.

Se puede observar una distribución agrupada cercana a los dos metros de distancia en ambos periodos de evaluación, sin embargo, esta tendencia se mantiene entre los límites de confiabilidad para distribuciones aleatorias, el mismo criterio se mantiene con la línea de tendencia hasta los doce metros distantes.

Figura 13. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 8 en tiempo 1 y tiempo 2.



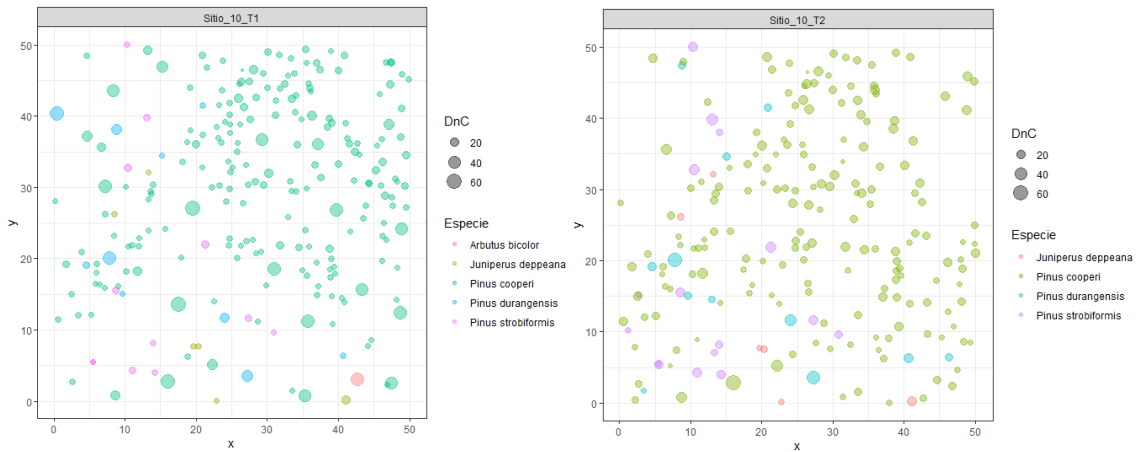
a) Distribución espacial observada para el sitio 9 en ambos periodos de evaluación



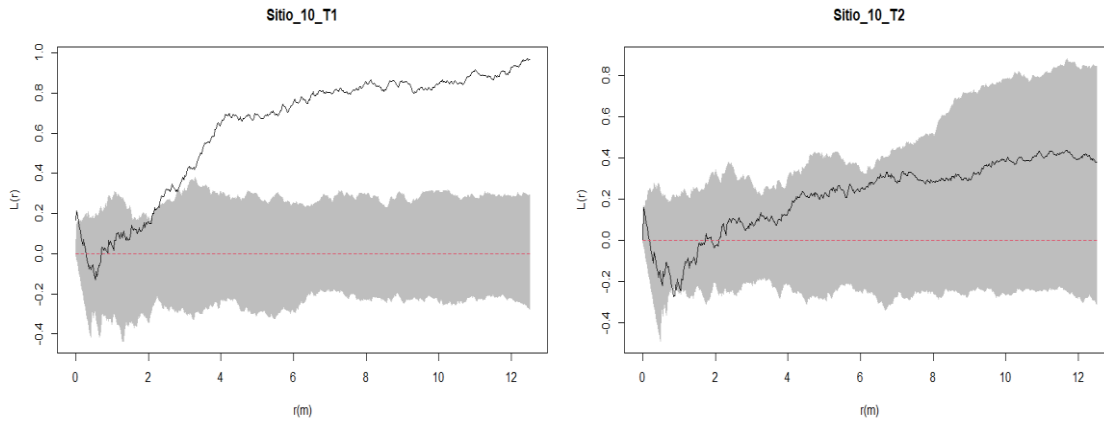
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 9 en ambos periodos de evaluación.

A pesar de los cambios en la línea de tendencia, se mantiene una distribución aleatoria pues la línea no excede los límites de confiabilidad.

Figura 14. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 9 en tiempo 1 y tiempo 2.



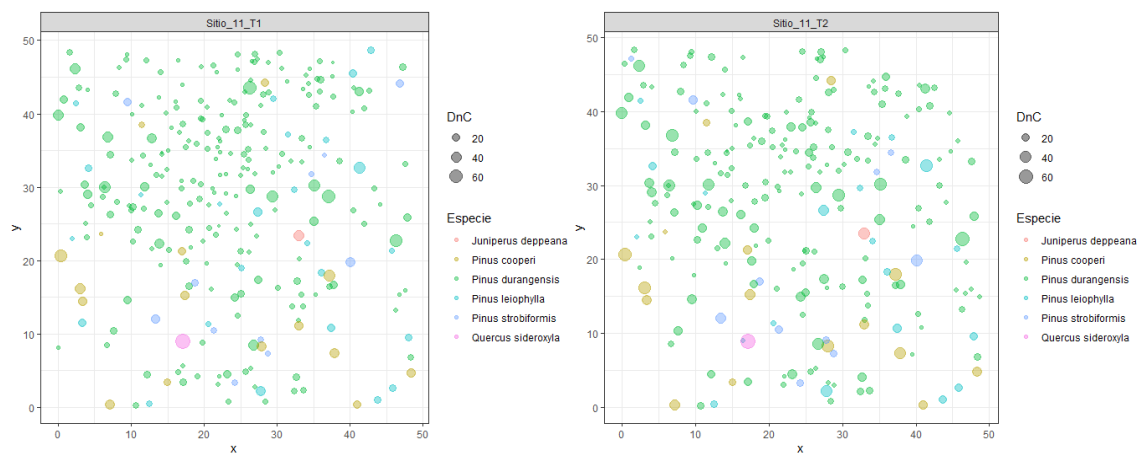
a) Distribución espacial observada para el sitio 10 en ambos periodos de evaluación



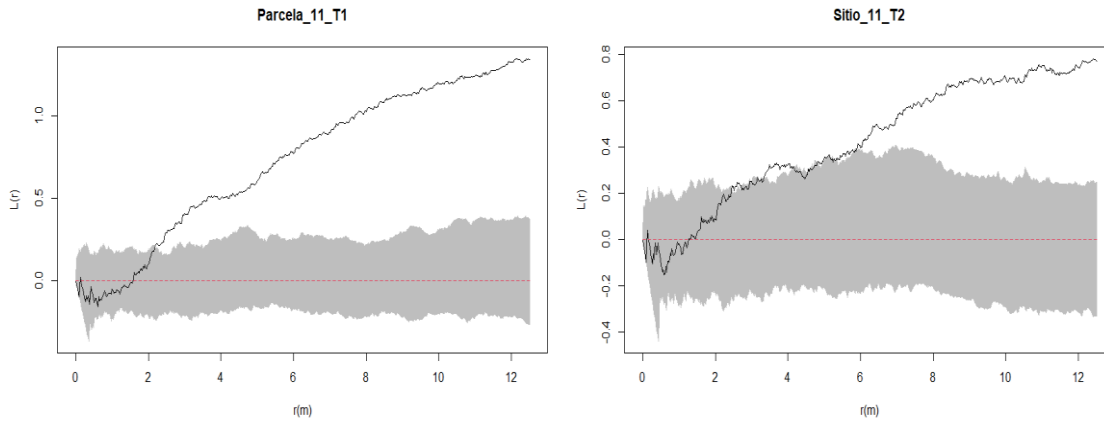
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 10 en ambos periodos de evaluación.

Antes de la aplicación del tratamiento silvícola se puede observar una distribución aleatoria en los primeros dos metros, la cual se redistribuye a una distribución en grupos hasta el límite distante (12 metros), sin embargo, se puede observar después de la corta (primer aclareo) un cambio en la distribución del arbolado completamente aleatoria.

Figura 15. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 10 en tiempo 1 y tiempo 2.



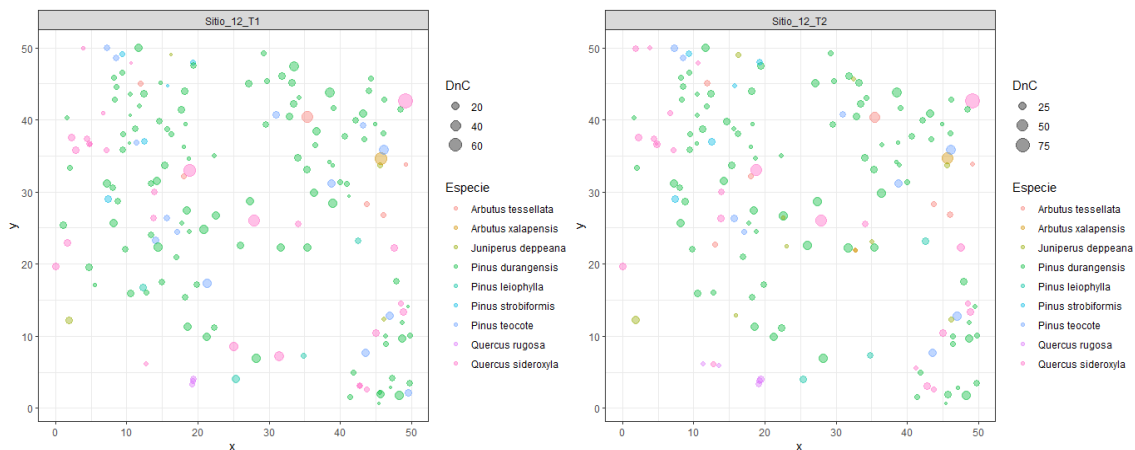
a) Distribución espacial observada para el sitio 11 en ambos periodos de evaluación



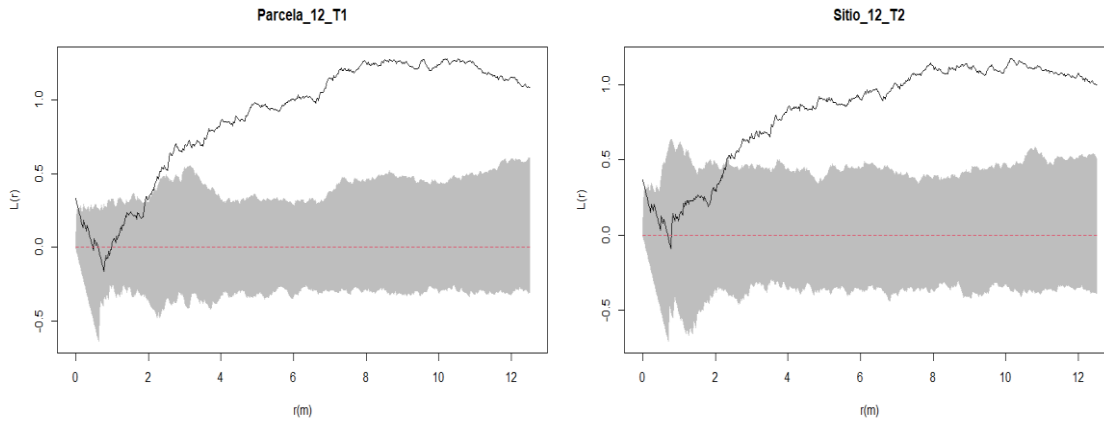
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 11 en ambos periodos de evaluación.

En el primer inventario se observa una tendencia clara a la formación de manchones o grupos después de los primeros dos metros distantes. Después de la corta se observa una baja a la tendencia de distribución ya que hasta los primeros 6 metros distantes tenemos una distribución aleatoria, la cual entre los 6 y 12 metros evaluados se distribuye en grupos pero que tiende a presentarse en menor límite [$L(r)$] a lo largo del análisis distante.

Figura 16. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 11 en tiempo 1 y tiempo 2.



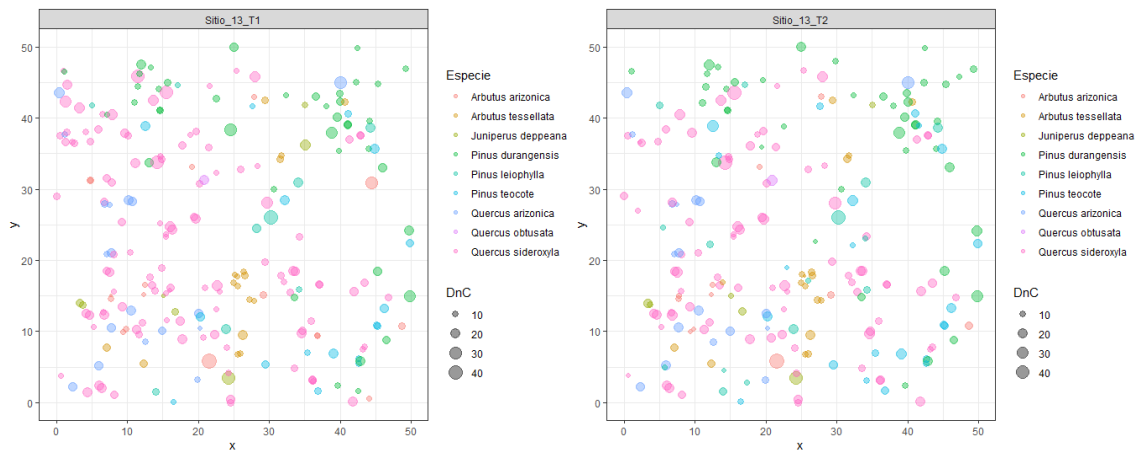
a) Distribución espacial observada para el sitio 12 en ambos periodos de evaluación



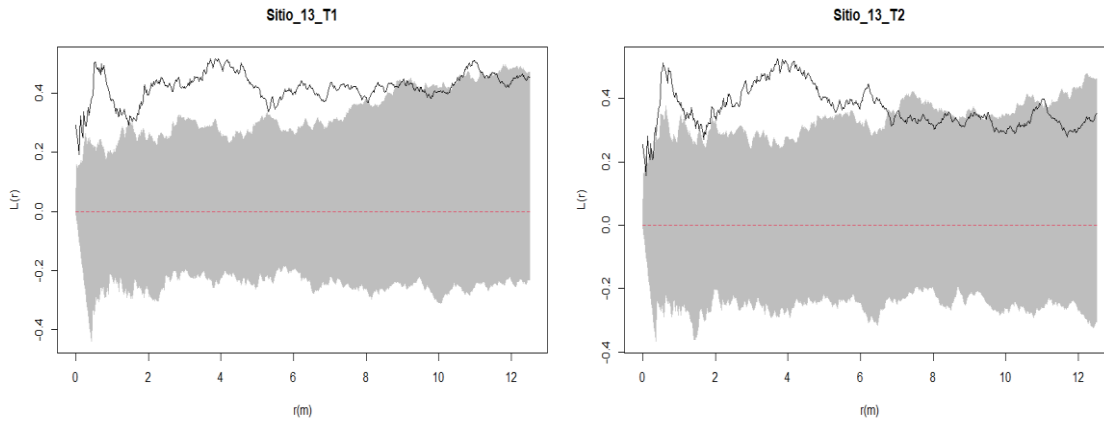
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 12 en ambos periodos de evaluación.

Aun después de la corta silvícola la distribución mantiene sus criterios, se muestran de manera aleatoria en los primeros dos metros distantes para posteriormente tender a la formación de grupos de árboles.

Figura 17. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 12 en tiempo 1 y tiempo 2.



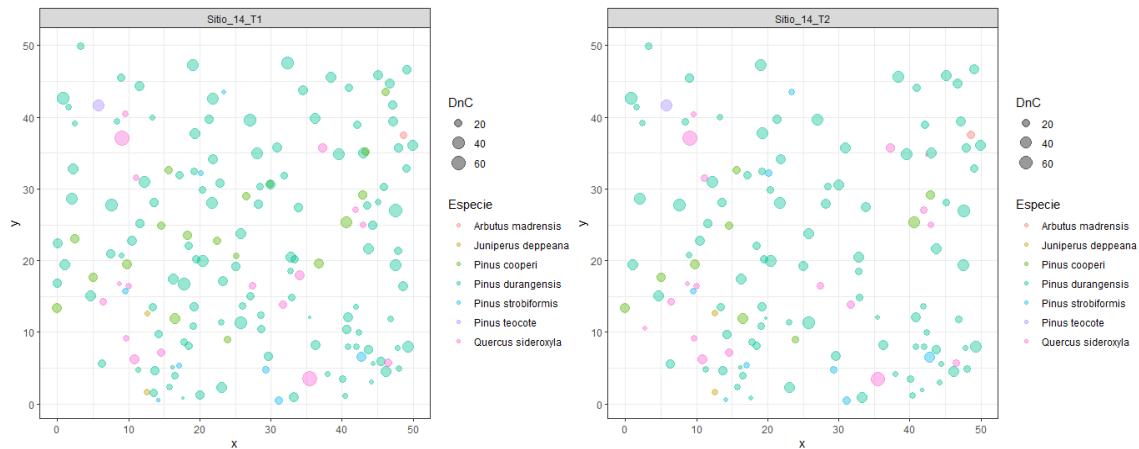
a) Distribución espacial observada para el sitio 13 en ambos periodos de evaluación



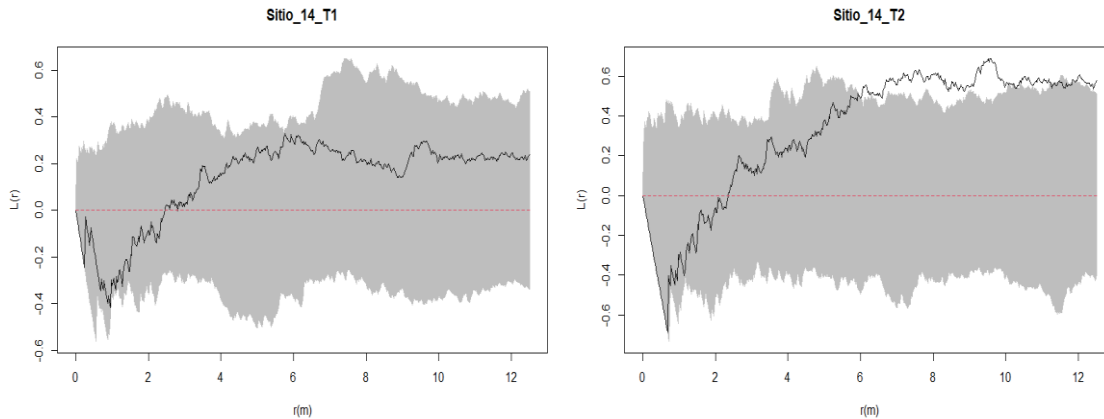
b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 13 en ambos periodos de evaluación.

Podemos observar que se mantiene el criterio de distribución espacial, la línea de tendencia se encuentra en los límites para una distribución aleatoria en los primeros 8 metros distantes, posteriormente se incorpora para mantener una distribución completamente al azar en ambos periodos de evaluación.

Figura 18. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 13 en tiempo 1 y tiempo 2.



a) Distribución espacial observada para el sitio 14 en ambos periodos de evaluación



b) Estimación de los valores de $L(r)$ (línea continua) para sitio 14

Se puede observar un cambio en la línea de tendencia de la distribución después de la aplicación del segundo aclareo, a partir del metro distante 6 la distribución tiende a cambiar de aleatoria a una ligera formación de grupos.

Figura 19. Distribución espacial del arbolado a), y valores de $L(r)$ b), para el sitio 14 en tiempo 1 y tiempo 2.

4. Discusión

4.1 Caracterización del patrón de análisis a nivel vecindad Mezcla de especies

Leyva-López et al. (2010) al evaluar el método de regeneración natural de árboles padres de tres rodales, y áreas adyacentes no encontró diferencias significativas de diversidad arbórea. Posiblemente esto se debe a que en las áreas analizadas se obtuvo un tiempo de recuperación de 15 años. Hernandez et al. (2019), al evaluar el mismo método en un intervalos de 10 años en bosques mixtos del estado de Durango demostró que el tratamiento silvícola no afecta la composición y diversidad de especies arbóreas. Monarrez-Gonzalez et al. (2020), al evaluar el efecto inmediato de prácticas silvícolas que incluyeron manejo intensivo, semi intensivo y conservador demostraron que no hubo cambios estadísticos significativos antes y después de la aplicación en los tratamientos semi intensivo y conservador, la excepción ocurrió en el tratamiento de talarasa, lo que concuerda con Nívar-Cháidez & González-Elizondo, (2009), quien al evaluar la diversidad en la aplicación de distintas intensidades de corta con remoción del área basal del 0%, 20%, 30%, 50%, 70% y 100%, determinaron que la diversidad disminuye conforme aumenta la

remoción del área basal, por lo que nuestros resultados no concuerdan con lo descrito anteriormente.

Se ha documentado que las cortas bajo el tratamiento de selección reducen la diversidad arbórea, ya que solo se aprovechan arboles dominantes y maduros de importancia maderable (Graciano-Luna, 2001), en este estudio el valor porcentual de *Mi* para los sitios tratados con MMOBI se redujo un 0.01% para los sitios 1 y 4, aumentando sus valores en los sitios restantes. Por lo que podemos considerar que la diversidad y mezcla de especies no se modifican considerablemente. Un factor importante para la recuperación de las especies es el tiempo en años que transcurre desde la instalación del sitio, la aplicación del tratamiento y la remediación de los mismos, sin embargo, a pesar de que difieren para cada sitio, la diversidad promedio general de *Mi* (0.53) es mayor al valor reportado por Solís-Moreno et al. (2006), (0.44) para un sitio intervenido mediante selección en bosques templados de Tepehuanes, Durango.

Solís-Moreno et al. (2006), al evaluar aclareos en el estado de Chihuahua indican que este tratamiento favorece la abundancia de *P. leiophylla*, puesto que la corta fue dirigida a especies de menor valor comercial, *Quercus*, *Arbutus* y *Juniperus*. En este estudio los valores de *Mi* para el tratamiento de primer aclareo fueron superiores después de la aplicación silvícola, en cambio, para el tratamiento de segundo aclareo se redujo el valor de *Mi*, una explicación lógica sería que en el sitio bajo segundo aclareo había frecuencias relativas similares de especies y la corta fue dirigida a la especie con mayor abundancia; una vez realizada la cosecha se homogenizaron las especies, mientras que, en el primer aclareo se mantuvieron los valores de abundancia relativa.

Distribución espacial

No se demuestran grandes cambios en la distribución del arbolado después de la aplicación de los diferentes tratamientos silvícolas, ya que los valores de *Wi* se mantienen entre los límites de clasificación de acuerdo a sus distribuciones. Se considera que la masa arbolada tiene una distribución aleatoria, lo que coincide con los resultados generados mediante el índice de información direccional de Corral-Rivas et al. (2010), estos resultados son diferentes a los reportados por Solís-Moreno et al. (2006), quienes registran valores de $Wi=0.57$ para dos sitios

manejados con selección y aclareos, respectivamente. Castellanos-Bolaños et al. (2008), al evaluar la estructura espacial de cuatro condiciones silvícolas definidas como: latizal, fustal joven, fustal medio y fustal viejo, determinaron una distribución al azar del arbolado con valores de $W_i = 0.50, 0.51, 0.54$ y 0.52 , respectivamente. Las disimilitudes de valoración para categorizar la distribución espacial del estrato arbóreo en base al índice de uniformidad de Gadow (W_i), se debe a que diversos autores determinan distribuciones aleatorias valores entre 0.4 y 0.6, valores menores a 0.4 distribuciones regulares y mayores a 0.6 un patrón agrupado (Castellanos-Bolaños et al., 2008; Graciano-Ávila et al., 2019; Rubio-Camacho et al., 2017).

Diferenciación dimensional

De acuerdo con el índice de diferenciación dimensional para diámetros y alturas, se demuestra que existen árboles de diferentes tamaños que conviven entre sí. De manera general los promedios de TD_i fueron 0.65 y 0.67, en tiempo 1 y tiempo 2 respectivamente, categorizando su diferenciación en escala fuerte, mientras que para TH_i fueron 0.54 en tiempo 1 y 0.56 en tiempo 2, dentro de escala clara. Siguiendo con la categorización por método silvícola para MMOBI, los resultados de TD_i fueron de 0.67 y 0.70, y para MDS 0.62 y 0.64 dentro de la escala fuerte, y para TH_i 0.57 y 0.62, cambiando de clara a fuerte en MMOBI, mientras que para MDS 0.52 y 0.50 con clasificación clara.

Graciano-Ávila et al. (2019), reporta valores de TD_i de 0.33 y 0.36 para una diferenciación moderada en dos sitios con tratamiento de corta de regeneración y corta de selección, respectivamente, resultados diferentes a los reportados en este estudio. Solís-Moreno et al. (2006), para dos sitios intervenidos con selección y aclareos reportaron un TD_i de 0.60 (fuerte) y 0.58 (clara). Silva-González et al. (2021), reportaron un promedio de TD_i de 0.66 10 sitios operados con MDS, para una diferenciación fuerte del arbolado, lo anterior es característico de las masas irregulares en donde podemos encontrar arbolado de diferentes dimensiones. Jiménez-Pérez et al. (2009), menciona que una diferenciación diamétrica escasa se produce cuando las áreas son desprovistas de su vegetación original, y por consiguiente los arboles tienen las mismas condiciones ambientales para su crecimiento, desarrollo y posiblemente su edad, lo cual puede ocurrir en

plantaciones forestales. Los valores registrados de *THi* demuestran ser consistentes con los de diferenciación diamétrica, siguiendo las mismas categorías de clasificación, este mismo patrón se determina con otros estudios (Graciano-Ávila et al., 2019; Jiménez-Pérez et al., 2009; Silva-González et al., 2021; Solís-Moreno et al., 2006).

Los valores del índice de dominancia indican que existen todas las clases sociales representadas de manera equitativa, los valores promedios de *Ui* fueron 0.51 antes y después de la aplicación del manejo forestal, este valor es mayor al reportado por Solís-Moreno et al. (2006), quienes reportan un valor de 0.44 un sitio operado con selección y 0.47 un sitio operado con aclareo. Silva-González et al. (2021), reportaron un valor de 0.51 para un promedio de seis sitios operados con un primer aclareo, mismo promedio en este estudio y 0.5 para promedio de cuatro sitios operados con un segundo aclareo, valor menor al reportado en este estudio (0.53).

4.2 Caracterización del patrón de análisis de puntos

Solís-Moreno et al. (2006), menciona que es necesario realizar investigaciones para evaluar la distribución espacial no solo con la caracterización de análisis de patrón puntos a nivel vecindad, si no que se deben utilizar técnicas mayormente sofisticadas como la función $K(r)$ de Ripley (Ripley, 1981), que compara la distribución acumulada de las distancias entre todos los árboles de una determinada área.

En este estudio se registró una distribución aleatoria y agrupada, independientemente del tratamiento silvícola la mayoría de los sitios mantiene sus criterios de distribución, sin embargo, se observan algunas modificaciones en los sitios 1 y 5 operados con selección, en los sitios 10 y 11 intervenidos con un primer aclareo y el sitio 14 bajo el tratamiento de segundo aclareo. El sitio 1 aumento sus valores de escala de distribución en grupos, esto se debe a que en este sitio se extrajeron 20 individuos pero se incorporaron 53 creando manchones en la masa arbórea. El sitio 5 también aumento sus valores de escala de distribución en grupos, sin embargo, hubo una reducción alta en el número de individuos ya que después de la corta, se registraron 22 tocones y 27 individuos muertos lo que creo que en el resto del arbolado formara grupos de árboles. El sitio 10 cambio su distribución de

agrupada a aleatoria generado por un decremento de 23 árboles ya que de los 92 individuos removidos se incorporaron 69, estos movimientos de la masa arbolada provoco cambios en la distribución espacial, algo similar ocurrió en el sitio 11, pero con menor proporción de acuerdo con los valores de la línea de tendencia; puesto que en este sitios se eliminaron 60 individuos para el segundo inventario, 51 cosechas y 9 muertes, pero hubo 26 incorporaciones, provocando modificaciones en la distribución arbolada, finalmente, en el sitio 14 los cambios de una distribución al azar a la formación de grupos o manchones después de la corta se debe a que de los 36 árboles aprovechados solo se incorporaron 4, dejado mayor espacio y arbolado en mayor competencia, lo cual no es congruente ya que la finalidad de los aclareos es eliminar la competencia y dejar una distribución uniforme(Solís-Moreno et al., 2006). La distribución regular no se determinó en ninguno de los sitios analizados, Castellanos-Bolaños et al. (2010) y Chávez-Flores et al. (2020), mencionan que no es posible encontrar estas distribuciones en bosques que se regeneran de manera natural como los analizados en este estudio, ya distribuciones uniformes son características de bosques plantados.

Luján-soto et al. (2008), menciona que el análisis del patrón de puntos de la distribución espacial es dependiente de la escala que se realicen, ya que se pueden encontrar diferentes tipos de distribución del arbolado, en este estudio se pudo observar el mismo patrón para algunos sitios, sin embargo, después de la aplicación de algunos tratamientos silvícolas se observan modificaciones a mayores escalas.

Conclusiones generales.

La diversidad de especies encontrada en las comunidades vegetales operadas mediante el método silvícola de MMOBI es mayor que en MDS, esta diferencia se mantiene recurrentemente a pesar de la aplicación de los tratamientos silvícolas de selección y aclareos, respectivamente. Las variables dasométricas y parámetros ecológicos evaluados no difieren entre diferentes periodos de evaluación, por lo que la estructura del bosque no se ve afectada al momento de ser intervenida.

Se encontraron cambios en la estructura espacial del arbolado generados mediante la aplicación del manejo forestal, donde se registraron irregularidades en los valores medios del índice de mezcla de especies; algunos sitios modifican su distribución espacial, especialmente donde la extracción del arbolado fue de mayor intensidad, lo que conjuntamente modifico la diferencia de tamaños entre individuos.

Es importante realizar evaluaciones periódicas de los bosques bajo manejo forestal mediante sitios permanentes de investigación, para evaluar la aplicación de los diferentes tratamientos silvícolas y analizar la diversidad y estructura arbórea mediante la caracterización de las masas forestales y determinar si la gestión forestal es de manera sustentable.

Bibliografía

- Aguirre-Calderón, O. A. (2004). Índices para la caracterización de la estructura del estrato arbóreo de ecosistemas forestales. *Revista Ciencia Forestal En México*, 27, 5–27.
<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/900>
- 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>
- Aguirre-Calderón, O. A., Hui, A., Gadov, K. V., & Jiménez-Pérez, J. (2003). An analysis of spatial forest structure using neighborhood-based variables. *Forest Ecology and Management*. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00102-6)
- Aguirre, C. O. A., Jiménez-Pérez, J., Kramer, H., & Akca, A. (2003). Análisis estructural de ecosistemas forestales en el Cerro del Potosi, Nuevo Leon, México. *Eprints.Uanl.Mx*, VI, 219–225.
<https://www.redalyc.org/pdf/402/40260210.pdf>
- Alanís-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A., & Marroquín-de la Fuente, J. S. (2020). Muestreo ecológico de la vegetación. *Editorial Universitaria de La Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, N.L., México, July*, 245.
<https://www.researchgate.net/publication/343137042>
- Baddeley, A., & Turner, R. (2005). Spatstat: An R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software*, 12(6), 1–42.
<https://doi.org/10.1111/j.1540-4781.1939.tb01339.x>
- Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M., & López-Aguillón, R. (2008). Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 14(2), 51–63. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1421212>
- Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., & Velázquez-Martínez, A. (2010). DIVERSIDAD ARBÓREA Y ESTRUCTURA ESPACIAL DE BOSQUES DE PINO-ENCINO EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 39–52.
<https://www.redalyc.org/pdf/634/63438955004.pdf>
- Chávez-Flores, G. A., Corral-Rivas, J. J., Vega-Nieva, J. D., López-Serrano, P. M.,

- & Rubio-Camacho, E. A. (2020). Estructura espacial de los bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango. *Scholar.Archive.Org*, 11(59).
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.614>
- Colín, J. G., Aguirre-Calderón, O. A., Corral-Rivas, J. J., Viveros-Guerrero, E., Corral-Rivas, S., & Crecente-Campo, F. (2018). Influencia de la competencia en el crecimiento diamétrico de *Pinus durangensis* Martínez en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 94–121.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.145>
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2009). Restauración de ecosistemas forestales. Guía básica para comunicadores. Zapopan, Jal., México.
<https://docplayer.es/12021164-Restauracion-de-ecosistemas-forestales-guia-basica-para-comunicadores.html>
- Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., & Corral-Rivas, S. (2005). Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el bosque mesófilo de montaña «El Cielo», Tamaulipas, México. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 14(2), 217–228.
<https://doi.org/10.5424/srf/2005142-00885>
- Corral-Rivas, J. J., Vargas-Larreta, B., Wehenkel, C., Aguirre-Calderón, O. A., & Crecente-Campo, F. (2013). Guía para el Establecimiento, Seguimiento y Evaluación de Sitios Permanentes de Monitoreo en Paisajes Productivos Forestales. 93p.
http://forestales.ujed.mx/monafor/archivos/descargas/guias_manuales/Guia_para_el_Establecimiento_Seguimiento_y_Evaluación_de_Sitios_Permanetes_de_Monitoreo.pdf
- Corral-Rivas, J. J., Vargas Larreta, B., Wehenkel, C., Aguirre-Calderón, O. A., Álvarez-González, J. G., & Rojo-Alboreca, A. (2009). Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango. *Editorial de La Universidad Juárez Del Estado de Durango.*, Octubre 2017, 54p.
<https://www.researchgate.net/publication/305640430%0AGuía>
- Corral-Rivas, J. J., Wehenkel, C., Castellanos-Bocaz, H. A., Vargas-Larreta, B., &

- Diéguez-Aranda, U. (2010). A permutation test of spatial randomness: application to nearest neighbour indices in forest stands. *Journal Forest Research*, 15(4), 218–225. <https://doi.org/10.1007/s10310-010-0181-1>
- Cruz-Cobos, F., Mendía-Santana, R., Jiménez-Flores, A. A., Nájera-Luna, J. A., & Cruz-García, F. (2016). Ecuaciones de volumen para *Arbutus* spp.(madroño) en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*, 24(68), 41–47. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67448742006.pdf>
- De la Cruz, M. (2013). Avances en el análisis espacial de datos ecológicos: aspectos metodológicos y aplicados. In *ECESPA-Asociación Española de Ecología Terrestre. Móstoles, Madrid, España. 355 p.*
- Delgado-Zamora, D. A., Heynes-Silerio, S. A., Mares-Quiñones, M. D., Piedra-Leandro, N. L., Retana-Renteria, F. I., Rodríguez-Corral, K., Villanueva-Hernández, A. I., González-Elizondo, M. S., & Raicho-González, L. (2016). Diversidad y estructura arbórea de dos rodales en Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(33), 94–107. <https://pdfs.semanticscholar.org/f78c/f319cc8662c94ffa14b661b06e822f170f4c.pdf>
- Diéguez-Aranda, U., Alboreca-Rojo, A., Castedo-Dorado, F., Álvarez-González, J. G., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F., González-González, J. M., Pérez-Cruzado, C., Rodríguez-Soalleiro, R., López-Sanchez, C. A., Balboa-Murias, M. A., Gorgosa-Varela, J. J., & Sanchez-Rodríguez, F. (2009). Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. *Researchgate.Net*. Retrieved August 24, 2022, from https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Rojo-Alboreca/publication/312219888_Herramientas_selvicolas_para_la_gestion_forestal_sostenible_en_Galicia/links/5dc3e886299bf1a47b1c194b/Herramientas-selvicolas-para-la-gestion-forestal-sostenible-en-Galicia.pdf
- Diggle, P. J. (1983). Statistical analysis of spatial point patterns. *Academic Press. London, UK. 148 P.*
- Gadow, K. V., & Hui, G. (1999). Modelling Forest Development. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.*

- Gadow, K. V., & Hui, G. (2002). Characterizing forest spatial structure and diversity. *Researchgate.Net*. https://www.researchgate.net/profile/Klaus-Gadow/publication/264378931_Characterizing_forest_spatial_structure_and_diversity/links/53da65350cf2631430c82324/Characterizing-forest-spatial-structure-and-diversity.pdf
- Gadow, K. V., Sánchez-Orois, S., & Álvarez-González, J. G. (2007). Estructura y Crecimiento del Bosque. In *Gottingen, Alemania: Universidad de Gottingen*. (Vol. 2, Issue October). http://www.iww.forst.uni-goettingen.de/doc/kgadow/lit/kvgestructura_y_crecimiento_del_bosque.pdf
- González-Cueva, G. A., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Gallegos-Rodríguez, A. (2006). Evaluación de la diversidad y estructura espacial en el bosque tropical subcaducifolio la quebrada, Jalisco, México, empleando tres escalas de medición. In *Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México*. <http://eprints.uanl.mx/21144/>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., & Márquez-Linares, M. A. (2006). Vegetación y ecorregiones de Durango. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Durango *Instituto Politécnico Nacional Sigma s.n. Fracc. 20 de Noviembre II Durango, Dgo., 34220 México*. <https://www.researchgate.net/publication/322244135>
- González-Medrano, F. (2003). Las comunidades vegetales de México: propuesta para la unificación de la clasificación y nomenclatura de la vegetación de México. *Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F., México*. https://www.academia.edu/16702033/Vegetacion_de_mexico_gonzalez
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., & Mora-Olivo, A. (2019). DIVERSIDAD ESTRUCTURAL DE UN ECOSISTEMA FORESTAL EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO. In *Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México*. <https://core.ac.uk/download/pdf/286777635.pdf>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-

- Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Corral-Rivas, J. J. (2020). Cambios estructurales de la vegetación arbórea en un bosque templado de Durango, México. *Acta Botánica Mexicana*, 127. <https://doi.org/10.21829/ABM127.2020.1522>
- Graciano-Luna, J. J. (2001). Técnicas de evaluación dasométrica y ecológica de los bosques de coníferas bajo manejo de la Sierra Madre Occidental del centro sur de Durango, México. In *Tesis de maestría, Facultad de ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León, México*. - *Búsqueda de Google*. [https://www.google.com/search?q=Graciano%2C+J.+J.+\(2001\).+Técnicas+de+evaluación+dasométrica+y+ecológica+de+los+bosques+de+coníferas+bajo+manejo+de+la+Sierra+Madre+Occidental+del+centro+sur+de+Durango%2C+México.+Tesis+de+maestría%2C+Facultad+de+ciencias+F](https://www.google.com/search?q=Graciano%2C+J.+J.+(2001).+Técnicas+de+evaluación+dasométrica+y+ecológica+de+los+bosques+de+coníferas+bajo+manejo+de+la+Sierra+Madre+Occidental+del+centro+sur+de+Durango%2C+México.+Tesis+de+maestría%2C+Facultad+de+ciencias+F)
- Graciano, Á. G., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., & Luján-Soto, J. E. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 535–542. <https://doi.org/10.19136/ERA.A4N12.1114>
- Guevara-Fisher, Y. Y., Cruz-Cobos, F., Hernández, F. J., Nájera-Luna, J. A., Cruz-García, F., & Quiñonez-Barraza, G. (2021). Efecto de la corta de matarrasa en la diversidad de la regeneración arbórea en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(63), 28–47. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I63.709>
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (2018). Dinámica del crecimiento de un bosque templado bajo manejo en el noroeste de México. *Madera y Bosques*, 24(2). <https://doi.org/10.21829/MYB.2018.2421767>
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (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(3), 189–199. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.08.052>
- Hernandez, F. J., Deras-Avila, A. G., Deras-Avila, N. I., & Colin, J. G. (2019). Influence of the seed tree method on the diversity of regeneration in a mixed forest in Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 25(2), 219–234. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2018.09.066>
- Hui, G., & Gadow, K. V. (2002). Das Winkelmaß. Herleitung des optimalen Standardwinkels. *Allgemeine Forst-Und Jagdzeitung*, 173(10), 173–177. https://www.researchgate.net/profile/Klaus-Gadow/publication/291116943_Das_Winkelmaß-Theoretische_iiberlegungen_zum_optimalen_Standardwinkel/links/5874991a08aebf17d3b289cb/Das-Winkelmaß-Theoretische-iiberlegungen-zum-optimalen-Standardwinkel.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, [Inegi]. (2009). Cartas temáticas del estado de Durango. *Aguascalientes, México: Inegi*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, [Inegi]. (2015). Carta topográfica. Escala 1:50,000 F13-A18. *El Salto, Durango, Mexico: Inegi*.
- Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., Pando-Moreno, M., & González-Tagle, M. A. (2009). Análisis sobre el efecto del uso del suelo en la diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco. *Madera y Bosques*, 15(3), 5–20. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3090652.pdf>
- Kint, V., Lust, N., Ferris, R., & Holsthoorn, A. F. M. (2000). Quantification of forest stand structure applied to Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests. *Forest Systems*, 9(S1), 147–163. <https://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/681/678>
- Kint, V., Meirvenne, M. . V., Nachtergale, L., Geudens, G., & Lust, N. (2003). Spatial Methods for Quantifying Forest Stand Structure Development: A Comparison Between Nearest-Neighbor Indices and Variogram Analysis. *Forest Science*, 49(1), 36–49. <https://doi.org/10.1093/forestsience/49.1.36>.
- Leyva-López, J. C., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2010). PATRONES DE DIVERSIDAD DE LA REGENERACION NATURAL EN

- RODALES MEZCLADOS DE PINOS. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 16(2), 227–239.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.038>
- López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Monárrez-González, J. C., González-Tagle, M. A., & 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>
- Luján-soto, J. E., Aguirre-calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., & Treviño-Garza, E. J. (2008). COMPARACIÓN DE TRES ESCALAS DE CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL EN BOSQUES DE DURANGO, MEXICO. In *Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México.*
- Lujan-Soto, J. E., Corral-rivas, J. J., Aguirre-calderón, O. A., & Gadow, K. V. (2015). Grouping Forest Tree Species on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Allgemeine Forst Und*, 3(4).
https://www.researchgate.net/profile/Jose-Javier-Corral-Rivas/publication/275640880_Grouping_Forest_Tree_Species_on_the_Sierra_Madre_Occidental_Mexico/links/562e465f08ae04c2aeb5bfdf/Grouping-Forest-Tree-Species-on-the-Sierra-Madre-Occidental-Mexico.pdf
- Magurran, A. E. (1988). Diversidad ecológica y su medición. *Princeton University Press*, 200p.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=CuU9DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Magurran,+A.E.+1988.+Ecological+diversity+and+its+measurament.+Princeton+University+Press.+200+p.&ots=WBYe25HRDa&sig=nSZFWKMm-6i0uusLM4kL3hAZ3k0>
- Manzanilla-Quijada, G. E. (2021). Diversidad, Estructura y Distribución Potencial de Áreas Productivas en Bosques Templados de Nuevo León, México. *Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México.*
<http://eprints.uanl.mx/21932/1/1080315092.pdf>
- Manzanilla-Quijada, G. E., Mata-Balderas, J. M., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., & Yerena-Yamallel, J. I. (2020).

- Diversidad, estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(61).
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.703>
- Méndez-Osorio, C. (2018). ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE ESPECIES ARBÓREAS EN BOSQUES TEMPLADOS DE LA SIERRA MADRE DEL SUR, MÉXICO. *Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México*. <http://eprints.uanl.mx/16796/1/1080290341.pdf>
- Monarrez-Gonzalez, J. C., Gonzalez-Elizondo, M. A., Marquez-Linares, A., Gutierrez-Yurritaid, P. J., & Perez-Verdinid, G. (2020). Effect of forest management on tree diversity in temperate ecosystem forests in northern Mexico. *PLoS ONE*, 15(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233292>
- Mora-Donjuán, C. A., Buendía-Rodríguez, E., Rubio-Camacho, E. A., Alanís-Rodríguez, E., & Treviño-Garza, E. J. (2016). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL, COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE UN MATORRAL EN EL NORESTE DE MÉXICO. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(1), 87–95.
<https://scholar.archive.org/work/7mawvecirbhvdamnj36sdl3rsy/access/wayback/https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/download/200/179>
- Návar-Cháidez, J. J., & González-Elizondo, S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, 71–87. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-27682009000100005&script=sci_abstract&tlng=pt
- Pommerening, A., & Stoyan, D. (2006). Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(7), 1723–1739. <https://doi.org/10.1139/X06-060>
- Pretzsch, H. (1996). Strukturvielfalt als Ergebnis waldbaulichen Handels. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. *Sektion Ertragskunde, Jahrestagung, Neresheim*, 134–154.
- Rendón-Pérez, M. A., Hernández-de la Rosa, P., Velázquez-Martínez, A., Alcántara-Carbajal, J. L., & Reyes-Hernández, V. J. (2021). Composición, diversidad y estructura de un bosque manejado del centro de México. *Madera y Bosques*, 27(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712127>

- Ripley, B. D. (1977). Modelling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 39(2):172-212.
<https://www.jstor.org/stable/2984796>
- Ripley, B. D. (1981). *Spatial Statistics. University of London.*
https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=BDDPTdohXeYC&oi=fnd&pg=PR9&ots=YuyIY_P5Z_&sig=9Z2YRrY6MW9t9falsIYA9Ak7FIA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- RStudio Team. (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc. Boston, MA, USA. <http://www.rstudio.com>
- 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.Unam.Mx*, 88, 113–121.
<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.015>
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
https://www.academia.edu/9142430/VEGETACION_DE_MEXICO_Jerzy_Rzedowski
- Santiago-Ramírez, R., Pérez-Ángeles, G., Hernández-De la Rosa, P., Cetina-Alcalá, V. M., Plascencia-Escalante, O., & Clark-Tapia, R. (2019). Efectos del aprovechamiento forestal en la estructura, diversidad y dinámica de rodales mixtos en la Sierra Juárez de Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 25(3).
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531818>
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). The Theory of Mathematical Communication. *International Business*, 131.
https://pure.mpg.de/rest/items/item_2383164_3/component/file_2383163/content
- Silva-García, J. E., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jurado-Ybarra, E., Jiménez-Pérez, J., & Vargas-Larreta, B. (2021). Estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del noroeste de México. *Polibotánica*, 0(52), 89–102. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.52.7>

- Silva-González, E., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., & Corral-Rivas, J. J. (2022). Evaluación del aprovechamiento forestal en la diversidad y estructura de un bosque templado en Durango Assessment. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1017>
- Silva-González, E., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Alanís-Rodríguez, E., & Corral-Rivas, J. J. (2021). Efecto de tratamientos silvícolas en la diversidad y estructura forestal en bosques templados bajo manejo en Durango, México. *Madera y Bosques*, 27(2), 1–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722082>
- Solís-Moreno, R., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., & Corral-Rivas, J. J. (2006). Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 12(2), 49–64. <https://doi.org/10.21829/myb.2006.1221242>
- Soto-Cervantes, J. A., Padilla-Martínez, J. R., Domínguez-Calleros, P. A., Carrillo-Parra, A., Rodríguez-Laguna, R., Pompa García, M., García-Montiel, E., & Corral-Rivas, J. J. (2021). Efecto de cuatro tratamientos silvícolas en la producción maderable en un Bosque de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(67), 56–80. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I67.991>
- Statistical Analysis System Institute (SAS). (2009). *SAS/STAT® 9.1. User's Guide*. SAS Institute Inc. Cary, N. C., USA.
- Upton, G., & Fingleton, B. (1989). Spatial data analysis by example. Vol. 2: categorical and directional data. *Wiley, New York*.
- Wehenkel, C., Brazão-Protázio, J. M., Carrillo-Parra, A., Martínez-Guerrero, J. H., & Crecente-Campo, F. (2015). Spatial Distribution Patterns in the Very Rare and Species-Rich *Picea chihuahuana* Tree Community (Mexico). *PLoS ONE*, 10(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140442>