



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

APROVECHAMIENTO FORESTAL Y SU IMPACTO EN LA VEGETACIÓN Y
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN SANTA CATARINA IXTEPEJI, OAXACA.

Lizbeth Luna Bautista

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

La presente tesis titulada: **APROVECHAMIENTO FORESTAL Y SU IMPACTO EN LA VEGETACIÓN Y PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN SANTA CATARINA IXTEPEJI, OAXACA** realizada por la alumna: **Lizbeth Luna Bautista** bajo la dirección del **Consejo Particular** indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

Consejero



DR. ALEJANDRO VELÁZQUEZ MARTÍNEZ

Asesora



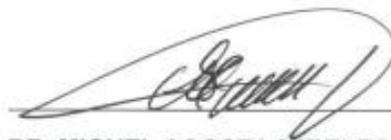
DRA. PATRICIA HERNÁNDEZ DE LA ROSA

Asesor



DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO

Asesor



DR. MIGUEL ACOSTA MIRELES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio del 2014

APROVECHAMIENTO FORESTAL Y SU IMPACTO EN LA VEGETACIÓN Y PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN SANTA CATARINA IXTEPEJI, OAXACA

Lizbeth Luna Bautista, M. C.
Colegio Postgraduados, 2014

RESUMEN GENERAL

Con la finalidad de conocer los efectos del manejo forestal sobre el componente vegetal y el suelo forestal en rodales bajo diferentes tratamientos silvícolas y tiempo de aplicación, se llevó a cabo la presente investigación en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. Se eligieron sitios con cuatro tratamientos silvícolas (Árboles Padre 2011 y 1998, Cortas de Selección 1998, Aclareo Ligero 2011) así como en áreas sin manejo como punto de comparación. Se analizó la riqueza, la composición y la diversidad de la vegetación en áreas muestreadas, además del Índice de Valor de Importancia (IVI) para el arbolado y algunas propiedades físicas del suelo como la densidad aparente, la resistencia mecánica y la humedad del suelo. En el área bajo estudio se registró un total de 43 especies que pertenecen a 31 géneros y 25 familias; las especies con mayor índice de valor de importancia fueron *Pinus oaxacana*, *Quercus magnifolia* y *Quercus rugosa*. Los resultados mostraron una mayor diversidad de especies en los estratos arbustivo y herbáceo en el bosque con manejo. En relación a las propiedades físicas del suelo, los resultados indican que la Densidad Aparente (Db) y la resistencia mecánica (RM) presentan diferencias significativas entre los diferentes tratamientos silvícolas. Lo anterior muestra una recuperación de las propiedades del suelo con el tiempo después de haber sido aplicados los tratamientos silvícolas, al compararlos con el bosque sin manejo. Sin embargo, para el caso de la humedad en el suelo, no hay claridad que permita concluir que esta variable no afecte el suelo después del manejo forestal y por lo tanto si su respuesta en el suelo es irreversible.

Palabras clave: diversidad vegetal total, estructura arbórea, actividad forestal, suelo forestal.

**FORESTRY AND ITS IMPACT ON VEGETATION AND SOIL PHYSICAL
PROPERTIES IN SANTA CATARINA IXTEPEJI, OAXACA**

Lizbeth Luna Bautista, M. C.
Colegio Postgraduados, 2014

ABSTRACT

In order to understand the effects of forest management on plant component and the forest floor in stands under different silvicultural treatments and time of application, was conducted this research in the community of Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. Sites with four silvicultural treatments (trees and Father 2011 1998 Short Selection 1998 Aclareo Light 2011) and in areas without management as a comparison were chosen. Richness, composition and diversity of vegetation in sampled areas, besides the Importance Value Index (IVI) for woodland and some soil physical properties such as bulk density, mechanical strength and soil moisture was analyzed. In the study area a total of 43 species belonging to 31 genera and 25 families were recorded; species with the highest importance value were oaxacana Pinus, Quercus rugosa and Quercus magnifolia. The results showed a greater diversity of species in the shrub and herbaceous layers in forest management. In relation to the physical properties of the soil, the results indicate that the apparent (Db) density and mechanical strength (RM) with significant differences between the different silvicultural treatments. This shows a recovery of soil properties with time after being applied silvicultural treatments, when compared to unmanaged forest. However, for the case of soil moisture, it is not clear to conclude that this variable does not affect the ground after forest management and therefore if your answer in the soil is irreversible.

Key words: Forest diversity, forest structure, silvicultural management, forest soils.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme y guiarme una vez más en ésta etapa de mi vida, por ser mi fortaleza en los momentos difíciles, por las nuevas experiencias y sobre todo felicidad.

Al Colegio de Postgraduados campus Montecillo por haber permitido realizar mis estudios de maestría y en especial al programa en Ciencias Forestales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de postgrado.

A los profesores del Programa en Ciencias Forestales por sus conocimientos y experiencias que contribuyeron en mi formación.

Al Dr. Alejandro Velázquez Martínez por fungir como mi consejero, por el tiempo, apoyo, la disponibilidad y aportaciones, agradezco también la confianza que deposito en mí.

A la Dra. Patricia Hernández de la Rosa por sus enseñanzas, por todo su apoyo, paciencia y el tiempo dedicado a la revisión y realización de este documento.

Al Dr. Armando Gómez Guerrero por las asesorías, sugerencias y por el tiempo dedicado para enriquecer este trabajo.

Al Dr. Miguel Acosta Mireles por sus aportes y sugerencias a la presente tesis.

Al Comisariado de Bienes Comunales de la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji por darme la oportunidad de realizar mi investigación y por todo el apoyo brindado.

A todos mis amigos y compañeros que por temor a omitir nombres no menciono individualmente con los que compartí esta etapa, gracias por todos momentos agradables compartidos, bromas y risas.

DEDICATORIA

Con admiración y amor a mis padres Eleazar Luna y Gloria Bautista por su amor, apoyo incondicional por una vida de sacrificios y esfuerzos, por ser mi guía en el camino para poder llegar a este punto de mi carrera, que con su ejemplo, dedicación y palabras de aliento nunca bajaron los brazos aun cuando todo parecía complicarse.

A ti Dami por toda la felicidad que das a mi vida a ti mi angelito que siendo tan pequeño me enseñaste el valor de la perseverancia para salir adelante así como enseñarme a vivir cada día como si fuera el último.

A Juan Miguel por todo su amor, confianza, alegrías y todo el apoyo que me ha brindado, por los momentos buenos y malos que hemos pasado.

A mis queridas hermanas Idalia y Aremi por todas las vivencias por estar siempre presentes y apoyarme de manera incondicional esta etapa profesional.

A mis suegros Juan Santiago y Elena Pérez por todo su apoyo en este largo caminar.

Gracias a todos, porque mis logros son suyos también.

Lizbeth

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO 2 ESTRUCTURA, RIQUEZA, COMPOSICIÓN Y DIVERSIDAD VEGETAL EN ÁREAS BAJO MANEJO EN SANTA CATARINA IXTEPEJI, OAXACA.....	4
2.1 RESUMEN	4
2.2 ABSTRACT	5
2.3 INTRODUCCIÓN	6
2.4 Objetivo general	7
2.4.1 Objetivos específicos.....	8
2.5 REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
2.5.1 El manejo forestal.....	8
2.5.2 Antecedentes del manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji	10
2.5.3 Estructura del bosque.....	11
2.5.4 Análisis estructural	12
2.5.5 Diversidad de la cubierta vegetal	14
2.6 MATERIALES Y MÉTODOS	14
2.6.1 Descripción del área de estudio	14
2.6.2 Diseño de muestreo	16
2.6.3 Análisis de información.....	21
2.6.5. Índices de semejanza florística (diversidad beta).	27
2.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
2.7.1 Estructura del bosque.....	28

2.7.2	Índice de valor de importancia.....	36
2.7.3	Composición florística	39
2.7.4	Formas de vida.....	41
2.7.5	Índices de diversidad.....	45
2.8	CONCLUSIONES.....	50
CAPÍTULO 3 EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN SANTA CATARINA IXTEPEJI OAXACA..... 53		
3.1	RESUMEN	53
3.2	ABSTRACT	54
3.3	INTRODUCCIÓN	55
3.4	OBJETIVOS	56
3.4.1	Objetivo general	56
3.4.2	Objetivos específicos.....	56
3.5	REVISIÓN DE LITERATURA.....	57
3.5.1	Suelo	57
3.5.2	Disturbios en el suelo	58
3.5.3	Resistencia mecánica.....	58
3.5.4	Densidad aparente	59
3.5.5	Humedad del suelo	60
3.5.6	La densidad aparente y el desarrollo de las plantas	61
3.6	MATERIALES Y MÉTODOS	62
3.6.1	Área de estudio	62
3.6.2	Diseño de muestreo	62

3.6.3	Toma de datos en campo.....	62
3.6.4	Medición de variables.....	64
3.6.5	Análisis de laboratorio.....	65
3.6.6	Análisis de datos.....	67
3.7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
3.7.1	Densidad aparente.....	68
3.7.2	Resistencia mecánica.....	69
3.7.3	Humedad del suelo.....	75
3.8	CONCLUSIONES.....	78
CAPÍTULO 4	CONCLUSIONES GENERALES.....	79
CAPÍTULO 5	LITERATURA CITADA.....	80
ANEXOS	95

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Sitios muestreados para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	18
Cuadro 2.2. Área basal y densidad promedio por tratamiento silvícola en Santa Catarina Ixtepeji Oaxaca.	36
Cuadro 2.3. Índices de diversidad por forma de vida para bosques con manejo y sin manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	47
Cuadro 2.4. Índices de diversidad por forma de vida para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	48
Cuadro 2.5. Índice de semejanza florística para cada uno de los tratamientos silvícolas y el bosque no manejado en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. .	49
Cuadro 3.1. Suma de cuadrados y cuadrados medios del análisis de varianza para la densidad aparente de tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji.....	69
Cuadro 3.3. Suma de cuadrados y cuadrados medios del análisis de varianza para la resistencia mecánica de tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji.....	72
Cuadro 3.5. Suma de cuadrados y cuadrados medios del análisis de varianza para la humedad del suelo de tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Localización del área de estudio dentro del predio comunal de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	15
Figura 2.2. Área bajo manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca con los sitios de muestreo establecidos en campo (marcados con puntos AP= Árboles Padre, CS= Cortas de Selección, AL= Aclareo Ligerero, BNM= Bosque No Manejado.....	17
Figura 2.3. Esquema para el establecimiento de sitios de muestreo en cada uno de los rodales evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.	19
Figura 2.4. Distribución de las categorías diamétricas para las áreas con manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	29
Figura 2.5. Distribución de las categorías diamétrica para las áreas sin manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	30
Figura 2.6. Distribución de las categorías diamétricas por tratamiento silvícola y en el bosque sin manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	32
Figura 2.7. Distribución de alturas para el total de sitios muestreados en bosque sin manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.	33
Figura 2.8. Distribución de alturas para el total de sitios muestreados en bosques con manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.	34
Figura 2.9. Distribución de las categorías de altura por tratamiento silvícola y bosque sin manejo evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oax.	35
Figura 2.10. Índice de Valor de Importancia (IVI) entre los diferentes tratamientos silvícolas evaluados y el bosque sin manejo evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	38
Figura 2.11. Familias presentes en el bosque sin manejo en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. (Los colores indican géneros dentro de cada familia).....	42
Figura 2.12. Familias presentes en el bosque con manejo en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. (Los colores indican géneros dentro de cada familia).....	42
Figura 2.13. Familias presentes para cada uno de los tratamientos evaluados en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji Oaxaca (Los colores indican géneros dentro de cada familia).....	43

Figura 2.14. Distribución de las formas de vida para los bosques con y sin manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	44
Figura 2.155. Distribución de las formas de vida para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	45
Figura 2.166. Gráfica de acumulación de especies para los diferentes tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.....	46
Figura 3.1 Distribución de los puntos de muestreo para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.	63
Figura 3.2. Valores medios y error estándar de la densidad aparente para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, BNM= Bosque sin Manejado, AP=Árboles Padre, AL=Aclareo Ligero, CS= Cortas de Selección Letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$)	69
Figura 3.3.Resistencia Mecánica para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados comparados con el bosque no manejado en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji. BNM= Bosque sin Manejado, AP=Árboles Padre, AL=Aclareo Ligero, CS= Cortas de Selección. La línea verde horizontal indica el límite crítico de resistencia (Gómez <i>et al.</i> , 2002) 70	
Figura 3.4. Valores medios y error estándar de la resistencia mecánica para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji. Letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), BNM= Bosque no Manejado, CS=Cortas de Selección, AL= Aclareo Ligero, AP=Árboles Padre.	73
Figura 3.5. Representación tridimensional de la resistencia mecánica para los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji. A= Bosque sin Manejado, B= Cortas de Selección 1998, C=Árboles Padre 2011, D= Árboles Padre 1998, E= Aclareo Ligero 2011	74
Figura 3.6. Medias de la humedad del suelo en cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji. Letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), BNM= Bosque sin Manejo, CS= Cortas de Selección, AP= Árboles Padre, AL= Aclareo Ligero.	76

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El manejo forestal sustentable (MFS) de los bosques permite utilizarlos dando valor al uso forestal como actividad permanente y supone la intervención del bosque para extraer productos maderables y no maderables, así como servicios dentro de los límites del potencial de productividad del ecosistema, que garantice una operación permanente y rentable de acuerdo con los criterios del manejo forestal (INAFOR, 2006).

Para lograr el MFS, los bosques deben ser manejados con base a sus características físicas, biológicas y ecológicas; tales como la topografía, el tipo de vegetación, la densidad, la biodiversidad entre otras características, sin embargo, la estrategia para aprovechar la vegetación, se basa en los objetivos del manejo. Por ejemplo, para manejar una zona de conservación y una área bajo aprovechamiento, los objetivos difieren. Mediante el manejo se busca capitalizar el máximo potencial productivo del suelo a través de la aplicación de las técnicas silvícolas adecuadas para cada condición del bosque, de tal forma que se garantice la conservación y producción del recurso forestal en forma continua en beneficio de la sociedad en general (Booco *et al.*, 2000).

El aprovechamiento de los bosques en México es una actividad que las comunidades realizan para subsistir y generalmente ocasionan impactos temporales que afectan una parte del dosel y el suelo disminuyendo su funcionalidad. Los impactos hacia los bosques se han identificado en diferentes lugares del mundo y en la mayoría de los casos, éstos son temporales, y en muchas ocasiones son negativos para las masas forestales, para la fauna y para el suelo.

Si el aprovechamiento que se le da al bosque es excesivo y las técnicas no son las adecuadas, los impactos pueden ser negativos y estar presentes en periodos de tiempo más largos y en consecuencia, la recuperación de los bosque se presentará en un periodo mayor y, en ocasiones, los daños que se pueden presentar son irreversibles o de alto costo (Kimmins, 1999).

En el manejo sustentable de los bosques es fundamental conservar la biodiversidad, y mantener la composición y estructura del mismo; así como mantener las asociaciones y el paisaje del ecosistema. El cambio de la estructura en un ecosistema es un indicador de cambio en la biodiversidad; sin embargo, tanto las prácticas silvícolas, como los regímenes de manejo forestal, modifican o pueden impactar negativamente los hábitats que conforman estos ecosistemas (Corral *et al.*, 2005; Del Río *et al.*, 2003).

Estos cambios en la estructura y diversidad del bosque pueden ser generados por un aprovechamiento selectivo (Corral *et al.*, 2005) y por las prácticas silvícolas que tienden a favorecer un selecto y reducido número de especies. Por lo anterior, la Silvicultura es compleja, si se pretende armonizar los criterios de sustentabilidad que implícitamente consideran conservar la biodiversidad (Gavilán y Rubio, 2005).

Los indicadores ecológicos tales como la abundancia, la dominancia y la frecuencia de las especies son utilizados para analizar la relación entre especies de una población (Jiménez *et al.*, 2001), y éstos se pueden determinar para estratos diferentes (Gavilán y Rubio, 2005). Por otro lado, los índices de estructura, diversidad alfa, beta y gama pueden utilizarse para evaluar el efecto del aprovechamiento forestal sobre las especies arbóreas del bosque (Aguirre *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2005); para medir diferencias en tiempo y espacio (Magurran, 2004); para controlar los cambios en la vegetación como resultado de los tratamientos silvícolas (Corral *et al.*, 2005) o para definir las prácticas que conduzcan a alcanzar un manejo forestal sustentable (Aguirre *et al.*, 2008).

En diversos países se han realizado investigaciones que evalúan los efectos del manejo forestal en la diversidad de especies. En México, los estudios más recientes sobre los efectos del manejo forestal en la composición y diversidad se han enfocado al análisis del componente arbóreo (Solís *et al.*, 2006; Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008; Návar y González, 2009; Leyva *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2013). Lo anterior, como una consecuencia de que el principal objetivo de los bosques y selvas es la obtención de productos maderables obtenidos

generalmente de una especie. Sin embargo, sólo algunos estudios en México han considerado la evaluación del efecto de las prácticas de manejo y tratamientos silvícolas en la estructura, composición y diversidad de otras formas de vida (arbustos y herbáceas) (Alanís *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2013) y los factores físicos del sitio (Vázquez *et al.*, 2010). El manejo adecuado de los bosques puede y debe apoyar la producción sustentable de una gran variedad de productos forestales maderables y no maderables, y por lo tanto, preservar la capacidad del bosque para brindar servicios ambientales, y proveer los medios de subsistencia para los dueños de las comunidades, lo cual implica la evaluación de diferentes variables biofísicas.

Este trabajo tuvo como finalidad evaluar el efecto del manejo forestal y la aplicación de los diferentes tratamientos silvícolas, en la respuesta de la vegetación residual y algunas propiedades del suelo en el tiempo, en bosques de la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, Ixtlán, Oaxaca.

El trabajo se presenta en tres capítulos. En el Capítulo I se presenta la introducción general. En el Capítulo II se espera responder a las preguntas sobre la estructura, composición y diversidad de los bosques manejados: esto es si ¿si la intensidad y tipo de corta influyen en la estructura diamétrica y de altura y el índice de valor de importancia de la vegetación arbórea al compararse con bosques sin manejo? ¿Cuál es la respuesta de las comunidades arbóreas, arbustivas y herbáceas en cuanto a composición y diversidad? ¿Cuál es la dinámica de recuperación de las variables de vegetación consideradas en un periodo de 1998- 2011?

En el Capítulo III se analiza el efecto del manejo en algunas propiedades físicas del suelo, contestando a la pregunta: ¿Cuál es el efecto de la intensidad, tipo y tiempo de aplicación de los tratamientos silvícolas en la resistencia mecánica, densidad aparente y retención de humedad del suelo?

CAPÍTULO 2 ESTRUCTURA, RIQUEZA, COMPOSICIÓN Y DIVERSIDAD VEGETAL EN ÁREAS BAJO MANEJO EN SANTA CATARINA IXTEPEJI, OAXACA

2.1 RESUMEN

Con la finalidad de conocer el efecto de las prácticas silvícolas en la riqueza, en la composición y en la diversidad de las especies arbóreas, herbáceas y arbustivas en un bosque de la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca, se evaluaron los tratamientos silvícolas: cortas de selección 1998, aclareo ligero 2011 y árboles padre 1998 y 2011. Se estimaron los índices de diversidad alfa y beta para la comunidad arbórea, arbustiva y herbácea, así como el Índice de Valor de Importancia (IVI) para el estrato arbóreo. Los resultados mostraron que el componente herbáceo es el más diverso tanto en rodales bajo manejo silvícola como sin manejo, seguido del componente arbustivo. De acuerdo con el IVI, la especie de mayor importancia ecológica fue el *Pinus oaxacana* en todos los tratamientos evaluados incluyendo al bosque sin manejo. Los resultados indican que el aprovechamiento forestal modifica la riqueza, la diversidad y la composición de los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo; siendo los estratos herbáceo y arbustivo los que más contribuyen a la diversidad, por lo que resulta importante evaluar al sotobosque ya que éste contribuye a dar una mejor explicación de la diversidad vegetal total del bosque.

Palabras clave: tratamiento silvícola, arbustos y herbáceas, estructura del rodal

2.2 ABSTRACT

This study was realized to know how silvicultural practices can affect the richness and the biodiversity of the overstory and understory vegetation in a forest of Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca State. Several silvicultural systems were evaluated: 1998 selection cutting, 2011 light thinning, and 1998 and 2011 seed trees. Beta and Alpha biodiversity indexes were estimated for all forest layers, and the Importance Value index (IVI) was estimated only for the tree layer. According to the IVI the species with the highest ecological importance was *Pinus oaxacana* in all silvicultural treatments evaluated including the forest without management. The results showed that harvest of the forest modifies richness, biodiversity, and the structural composition of all layers. The shrub and herbs layers had the greatest contribution to the diversity, for this, it is important to evaluate the understory composition in order to explain total forest vegetation diversity.

Key words: silvicultural treatment, shrubs and herbaceous, stand structure

2.3 INTRODUCCIÓN

La estructura de un ecosistema se define por el número, ordenamiento espacial y ordenamiento temporal de los elementos que lo constituyen; en donde destacan la diversidad de especies, la diferenciación dimensional y la distribución espacial de los árboles que se encuentran dentro de una determinada masa forestal (Gadow y Hui, 1999). Por lo tanto, una manera adecuada y precisa para describir la diversidad estructural, es a través de la caracterización de los estratos, considerando estos componentes (Danserau, 1957; Wadsworth, 2000; Gadow *et al.*, 2001).

La evaluación de los ecosistemas forestales con indicadores de diversidad tales como la abundancia, la dominancia y la frecuencia de las especies, se utiliza para analizar la relación entre las especies de una población (Jiménez *et al.*, 2001). La estructura de un bosque se puede definir como un indicador clave de la biodiversidad, la estabilidad ecológica y el desarrollo del ecosistema en el futuro (Kimmins, 1999). Por otro lado, los cambios en el ecosistema se pueden determinar para estratos diferentes del sistema forestal (Gavilán y Rubio, 2005). La estructura y diversidad alfa pueden utilizarse para evaluar el efecto del aprovechamiento forestal sobre las especies arbóreas del ecosistema (Aguirre *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2005); así como para evaluar las diferencias en tiempo y espacio (Magurran, 2004); y para controlar los cambios provocados por los tratamientos silvícolas (Corral *et al.*, 2005), además de que se pueden definir las prácticas que conduzcan a alcanzar un manejo forestal sustentable (Aguirre *et al.*, 2008).

A nivel internacional y en México, se han realizado investigaciones que evalúan los efectos del manejo forestal en la biodiversidad de especies en ecosistemas templados; así como estudios sobre los efectos del manejo forestal en la composición y diversidad del estrato arbóreo en bosques de clima templado (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008; Leyva *et al.*, 2010; Návar y González, 2009; Solís *et al.*, 2006; Corral *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2013).

La estructura, riqueza, composición y la diversidad, son algunos de los principales indicadores que permiten conocer la condición que presenta un ecosistema, los cuales son fácilmente modificables a través de las prácticas silvícolas (Pretzsch, 1998; Del Rio *et al.*, 2003; Torras y Saura, 2008). La caracterización de la diversidad de un ecosistema forestal constituye una de las condiciones básicas para la toma de decisiones sobre el manejo del ecosistema tanto en localidades que se encuentran bajo aprovechamiento, como en áreas protegidas, en donde pueden observarse procesos de sucesión natural, así como los efectos provocados por actividades antropogénicas, por lo que su adecuado conocimiento, es necesario para garantizar un manejo sustentable (Aguirre *et al.*, 1998; Acosta *et al.*, 2006).

Cuando se realiza manejo forestal, se busca simular los procesos que de manera natural ocurren en los ecosistemas, por ejemplo, la apertura de un claro, simula la caída natural de árboles por el efecto del viento o debido a un incendio, y a través de su estudio se puede entender cómo, bajo la apertura del dosel ocurre la repoblación y la dinámica de recuperación de la estructura del bosque después de un tiempo determinado. Para poder conocer los cambios, es útil el empleo de una serie de índices o variables que reflejan estas características en pequeñas superficies o rodales (Musálem y Fierros, 1996).

Los aspectos mencionados y la falta de información en el área de estudio motivaron esta investigación para conocer los cambios en la estructura, riqueza, composición y diversidad de especies en un bosque templado después de realizar un aprovechamiento forestal a través de diferentes tratamientos silvícolas, en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji Ixtlán, Oaxaca.

2.4 Objetivo general

Evaluar los cambios en la estructura, riqueza, composición y diversidad de la vegetación en respuesta a diferentes intensidades de manejo, tipos de tratamiento silvícola y tiempo de aplicación.

2.4.1 Objetivos específicos

Describir la estructura diamétrica, de altura y el índice de valor de importancia relativa (IVIR) para la vegetación arbórea, en respuesta a los tratamientos silvícolas, su intensidad y tiempo de aplicación.

Obtener la riqueza, la composición florística e índices de diversidad alfa y beta de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas en sitios con y sin manejo forestal para detectar sus cambios en respuesta a la intensidad, tipo y tiempo de realización de la corta silvícola.

2.5 REVISIÓN DE LITERATURA

2.5.1 El manejo forestal

El aprovechamiento forestal afecta al estrato arbóreo por el derribo de los árboles, modificando su estructura y condiciones ambientales originales. De acuerdo con la FAO (2010), el aprovechamiento forestal se define como “la combinación de diversas prácticas enfocadas no solo del aprovechamiento maderable, sino de cualquier recurso al que se le pueda dar algún tipo de uso”. Sin embargo, muchas de las actividades dentro del manejo pueden convertirse en prácticas negativas, si la intensidad, frecuencia y forma de aprovechamiento y uso no son las idóneas para las especies y condiciones ecológicas donde se apliquen, ya que ante todo, se busca promover la sustentabilidad.

A nivel mundial existen estudios en donde se abordan los efectos del manejo forestal. Algunos autores se han enfocado más en los bosques tropicales, ya que en estos se presenta una acelerada tasa de deforestación, que de acuerdo a Andersen y Mamani (2009), es de aproximadamente 320 m²/persona/año, 20 veces más alta que el promedio mundial (16 m² /persona/año).

En el análisis de la estructura de un bosque templado es importante considerar las características del medio físico. También es importante tomar en cuenta el uso de

índices cuantitativos que permitan analizar las influencias antropogénicas que ejercen los procesos de sucesión natural que ocurren en los ecosistemas forestales (Aguirre, 2004). Existe un número importante de estudios recientes sobre análisis estructural de comunidades (Nebel *et al.*, 2000; Corella *et al.*, 2001; Godínez y López, 2002; Rozas, 2002; Harper y MacDonal, 2002; Villavicencio y Valdez, 2003; Aguirre *et al.*, 2003; Pinazo *et al.*, 2003; Caldato *et al.*, 2003; Gallardo *et al.*, 2005; García *et al.*, 2010; Alanís *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2013). Dentro de estos, sobresalen aquellos en donde el índice de Shannon, es de los más reportados en la literatura (Godínez y López, 2002; Gallardo *et al.*, 2005; Villavicencio y Valdez, 2003).

Existen algunos estudios que documentan la relación de la abundancia de las especies en áreas con aprovechamiento forestal, en donde relacionan a la dominancia de la vegetación herbácea y arbustiva con un incremento de la disponibilidad de nutrimentos (Thiollay, 1992; Frumhoff, 1995; Davies, 1998; Coro, 1999; Fredericksen *et al.*, 1999; Fredericksen y Fredericksen, 2000). A pesar de que existen trabajos que reportan una disminución de la diversidad presente en el ecosistema a mediano plazo cuando se implementan prácticas silvícolas (Fredericksen y Fredericksen, 2000), la modificación de la estructura del bosque beneficia a algunas especies debido al aumento de los recursos limitantes y del espacio de crecimiento; sin embargo, afecta a otras, debido a las relaciones de competencia intra e inter-específica que se establecen y que reducen las tasas de sobrevivencia (Frumhoff, 1995).

En el estado de Oaxaca, la Sierra Norte es una de las regiones en donde de acuerdo a Smartwood (2006), el manejo forestal comunitario ha tenido mayor desarrollo. Ejemplo de ello es el municipio de Santa Catarina Ixtepeji, mismo que debido al desarrollo y aplicación de sus prácticas forestales, ha recibido una certificación forestal Internacional.

2.5.2 Antecedentes del manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji

La comunidad de Santa Catarina Ixtepeji se encuentra situada en la región conocida como Sierra Juárez. La comunidad tiene antecedentes prehispánicos y han ocupado su actual territorio desde antes de la llegada de los españoles a México. Ixtepeji cuenta con 21,058.9 ha bajo el régimen de Bienes Comunales o Comunidad Agraria (Chávez, 2005).

El aprovechamiento de los bosques de esta comunidad, como los de muchas otras de la Sierra Juárez, estuvo bajo el control de la empresa Paraestatal Fábricas de Papel Tuxtepec (FAPATUX) durante 23 años, entre 1957 y 1980; a finales de la década de los setenta, se generó un movimiento promovido por las propias comunidades de la Sierra Juárez para evitar que la mayoría de las concesiones se volvieran a renovar y, por lo tanto, se dieron condiciones para que las comunidades se hicieran cargo de las actividades forestales de aprovechamiento (Abardía y Solano, 1995).

Entre 1985 y 1989 Ixtepeji estuvo en la Unión de Comunidades y Ejidos Forestales de Oaxaca (UCEFO) y con la asesoría técnica y administrativa del equipo técnico de la Unión. Sin embargo, por conflictos internos, los pobladores de la comunidad de Ixtepeji decidieron suspender sus aprovechamientos forestales en año de 1989 reactivando su programa de manejo forestal en 1993 (Chávez, 2005).

Esta comunidad tiene un historial de aprovechamiento forestal de 40 años, en estos bosques se han aplicado principalmente dos sistemas silvícolas, el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares con cortas de selección en los primeros 25 años y más recientemente, el Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SiCoDeSi), este último, en los últimos 15 años (Anta, 2000).

2.5.3 Estructura del bosque

La estructura es la organización espacial de los individuos que forma un rodal, tipo de vegetación o una asociación de plantas. En general se considera que los elementos primarios son: la forma de crecimiento, la estratificación y cobertura. En los estudios de ecología de la vegetación se consideran principalmente cinco niveles estructurales que se integran de manera jerárquica y que incluyen la fisonomía de la vegetación, la distribución vertical y horizontal de la biomasa, las formas de vida y la composición florística (Mueller y Ellenberg, 1974).

La estructura de las comunidades forestales es un indicador de la composición de especies, de la diversidad de procesos y condiciones ecológicas que se lleva a cabo dentro del ecosistema y, cuando más favorables sean las condiciones, de humedad, de la entrada de luz y de nutrimentos, mayor será el número de estratos que se formen. Cada estrato posee un microclima y generalmente se asocia una comunidad diferenciada de fauna silvestre (Hunter, 1990).

Uno de los principales temas en cuanto a estudios de la estructura de las masas forestales es la distribución en el rodal y la diferenciación en diámetro, altura, tamaño de copa, así como también los diferentes estratos verticales que se establecen. Con el paso del tiempo cada estrato es ocupado por especies arbóreas que desarrollan una estructura vertical más compleja (Spurr y Barnes, 1980; Del Rio *et al.*, 2003).

La estructura vertical considera la ocupación espacial de los fustes sobre el suelo en términos de altura y su desarrollo es el resultado de las relaciones de competencia que se genera entre las especies vegetales que forman un bosque.

Los estratos de los ecosistemas forestales generalmente están bien definidos y se caracterizan por árboles, arbustos, hierbas heliófitas y microflora (como musgos, líquenes, hongos etc.); cada uno de estos estratos presentan condiciones específicas que hacen que las plantas puedan obtener el máximo aprovechamiento del espacio crecimiento, luz y los recursos microclimáticos,

además, la presencia de disturbios frecuentes, determina el predominio de alguna especie, mientras que en áreas más estables del dosel del bosque está dominado por especies tolerantes a la sombra (Spurr y Barnes, 1980).

Los cambios en la estructura y composición del bosque son la demanda constante que tiene cada árbol por más espacio de crecimiento y de la ocurrencia de los disturbios naturales o antropogénicos (Whitmore, 1999).

La estructura horizontal es el arreglo espacial que ocupan los árboles en el ecosistema. De acuerdo a Hartshorn (1980), los valores elevados en abundancia y frecuencia son características de las especies que presentan una distribución horizontal continua; por el contrario, una alta abundancia y una baja frecuencia, son características de especies con tendencia a la conglomeración local en grupos y pequeños grupos bastante distanciados unos de otros.

La distribución de diámetros en el bosque se representa generalmente a través de la distribución del número de individuos por categorías diamétrica, algunas masas forestales tienden a representar una “J” invertida principalmente cuando forman una masa incoetánea y en otros, en forma de campana (distribución normal), cuando se tiene masas coetáneas. En otros casos, por las características de desarrollo del rodal, no se presenta una tendencia definida en la distribución (Hartshorn, 1980; Clutter *et al.*, 1992).

2.5.4 Análisis estructural

Los parámetros utilizados para la descripción de un bosque son: diámetro, altura, área basal, volumen, edad y densidad, los cuales son esenciales; sin embargo, estos no son suficientes para comprender el funcionamiento de los ecosistemas forestales (Aguirre, 2004). El manejo de los bosques requiere bases científicas que expliquen el proceso de desarrollo en rodales forestales como son la complejidad, la estructura y procesos de desarrollo, los patrones espaciales de rodales en estados tardíos y el papel de los disturbios en la creación del legado

estructural que son elementos clave después de un disturbio (Franklin *et al.*, 2002).

Dentro de los elementos que componen la estructura de un ecosistema forestal, los árboles se consideran los más relevantes; las distintas especies representan características morfológicas y dan lugar a diferentes estructuras. El diámetro medio, la distribución diamétrica, la altura y la densidad, son características importantes de la estructura de un bosque. Los árboles de gran tamaño constituyen el hábitat de numerosas plantas epífitas y fauna que construyen su refugio. De acuerdo a Martin *et al.*, (2004), la diversidad es mayor en bosques maduros, ya que en ellos se encuentran un gran número de especies de helechos, palmas, bromelias, orquídeas y de otras plantas epífitas como musgos, líquenes etc. en comparación con bosques jóvenes. De igual forma, en los bosques maduros, se presenta una mayor área basal.

Otro componente importante de los rodales forestales es el sotobosque, es decir, la vegetación arbustiva y herbácea; la presencia de lianas y otros grupos de individuos que varían en función de la especie del estrato y las condiciones ecológicas del sitio (Nebel *et al.*, 2000; Harper y Mac Donal, 2002).

Diversos estudios han reportado la influencia de factores que afectan la estructura y diversidad en bosques. Por ejemplo, Peña (2003), encontró que la altura y el área basal de los árboles y la diversidad de especies están directamente relacionadas con la edad del rodal, aunque la diversidad, muestra una variación que depende del estrato del bosque estudiado.

Otro factor que se ha reportado en relación a la diversidad, se refiere al grado de perturbación del ecosistema. Algunos estudios indican que en bosques con menor perturbación y mayor edad, generalmente presentan la más alta diversidad de árboles y especies arbustivas (Onaindia *et al.*, 2004).

En general, los estudios sobre estructura arbórea son abundantes dentro de las diferentes comunidades (Díaz *et al.*, 2002; Franklin *et al.*, 2002; Godínez y López,

2002; Rozas, 2002; Caldato *et al.*, 2003; Pinazo *et al.*, 2003; Chhetri, 2004; Mejía *et al.*, 2004; Gallardo *et al.*, 2005), lo cual permitirá seguir generando bases para el manejo.

2.5.5 Diversidad de la cubierta vegetal

La diversidad de especies es un atributo de las comunidades medido por la heterogeneidad y la uniformidad de estas. La diversidad se compone de dos elementos; el primero es la variación de especies y el segundo, se refiere a la abundancia relativa de estas (Magurran, 1988; Pielou, 1997).

En general, se han reconocido tres niveles de diversidad: diversidad alfa, que es el número total de especies por sitio o diversidad intracomunitaria; diversidad beta o diversidad entre diferentes hábitats, que se refiere al número de especies de una región y finalmente la diversidad gama, que es la diversidad del todo el paisaje y que puede considerarse como la combinación de las dos anteriores (Koleff y Gaston, 2002; Chandy *et al.*, 2006).

Los niveles anteriores de diversidad se miden utilizando diferentes índices y modelos, que permiten evaluar los efectos de las actividades humanas (Toledo *et al.*, 2003).

2.6 MATERIALES Y MÉTODOS

2.6.1 Descripción del área de estudio

Ubicación geográfica: El área de estudio se encuentra en el municipio de Santa Catarina Ixtepeji, el cual se ubica en el distrito de Ixtlán ubicado en la Sierra Norte del estado de Oaxaca. Se localiza entre las coordenadas geográficas 17° 26' de latitud norte y 96° 34' longitud oeste, a una altitud de 1920 msnm (Figura 2.1) (Acevedo, 1998).

Clima: El clima que predomina es el Cb (w_1)(w)(i')_{gw}”, el cual corresponde a un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperaturas medias anuales de 17.6°C y una precipitación media anual que varía de 722 a 1000 mm (Acevedo, 1998).

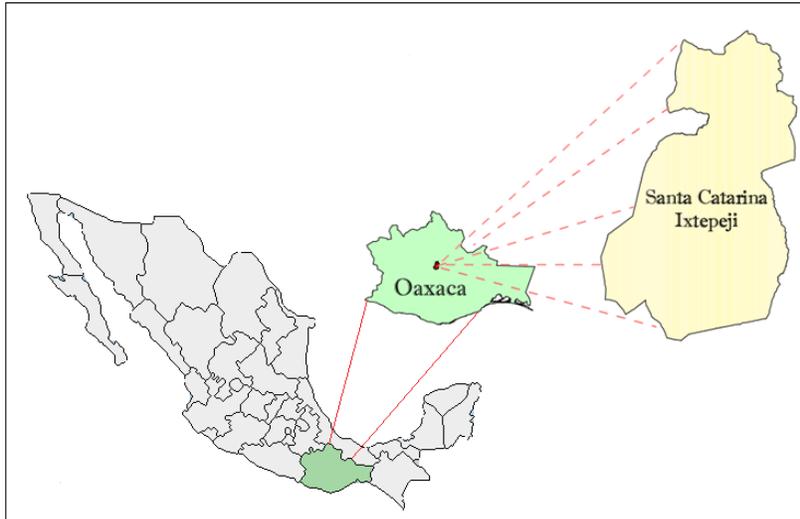


Figura 2.1. Localización del área de estudio dentro del predio comunal de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

Suelo: De acuerdo a la Clasificación de la FAO, el tipo de suelo en el área bajo estudio, es un Acrisol húmico (Ah) con textura media, éste se caracteriza por presentar en la superficie un horizonte mineral A rico en materia orgánica de color oscuro o negro sobre un horizonte de diagnóstico de tipo Bw o Bg con lavado intenso, pH ácido, pobre en nutrientes, y de color rojizo a amarillo. Además, presenta acumulación de arcilla en el subsuelo y es moderadamente susceptible a la erosión (Chávez, 2005).

Topografía: En el predio la topografía del terreno es muy variable, la mayor parte del área presenta laderas y pendientes que oscilan en intervalos de 40 a 60%. En las partes más accidentadas la pendiente máxima es mayor a 45° (100%) (Ortiz *et al.*, 2004).

Hidrología: El predio se encuentra en la región Hidrológica No. 28 denominada Papaloapan, que a su vez se divide en varias subcuencas con los ríos: Grande,

Papaloapan, Salado, Quiotepec, Santo Domingo, Santa Úrsula y Valle Nacional. La red hidrológica de la región número 28 cuenta con numerosos escurrimientos sinuosos y encañonados con tiempos de concentración pequeños, que producen grandes avenidas (Chávez, 2005).

Vegetación: La predominante es el bosque de pino-encino y bosque de encino; entre las especies más comunes están: *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl., *Pinus oaxacana* Mirov., *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., además de una pequeña superficie de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco var. *oaxacana* Debreczy y Rácz., Otras especies son: *Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl., *Quercus castanea* Nee y *Quercus rugosa* Nee (Acevedo, 1998).

Acevedo (1998) y Zacarías y Del Castillo. (2010) reportan especies de arbustos como *Calliandra hirsuta* (G. Don.) Benth. *Comarostaphyllis discolor* Diggs, *Calliandra grandifolia* (G. Don.) Benth, *Baccharis heterophylla* Kunth, *Calea ternifolia* Kunth, *Desmodium konzattii* Greenm., *Arbutus xalapensis* Kunth, *Senecio oaxacanus* Hemsl., entre otras. La especie *Litsea glaucescens* Kunth se encuentra catalogada dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-ECOL-059-2010 como en peligro de extinción en la comunidad.

Fauna: Las principales especies que dominan en el municipio de Santa Catarina Ixtepeji son: venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), ardilla (*Sciurus avieogaster*), conejo (*Sylvilagus floridanus*), coyote (*Canis latrans*), armadillo (*Dasypus poliocephala*), tlacuache (*Didelphys marsupialis*), zorrillo liso (*Mephitis macroura*), zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*) y el pájaro nacional (*Trogon mexicanus*) (Acevedo, 1998).

2.6.2 Diseño de muestreo

Área de muestreo

El muestreo se realizó en áreas bajo manejo forestal en aproximadamente 92 ha y en donde domina la especie *Pinus oaxacana*. En esta superficie se están llevando

a cabo cortas de regeneración a través del método de árboles padre y de selección y cortas intermedias (aclareos ligeros). Además se consideró muestrear áreas no manejadas del bosque de pino-encino cercanas a las manejadas. Las áreas de corta seleccionadas corresponden a las anualidades (1998-1999) y (2010-2011); el área efectiva de muestreo fue de 2.7 ha (Figura 2.2).

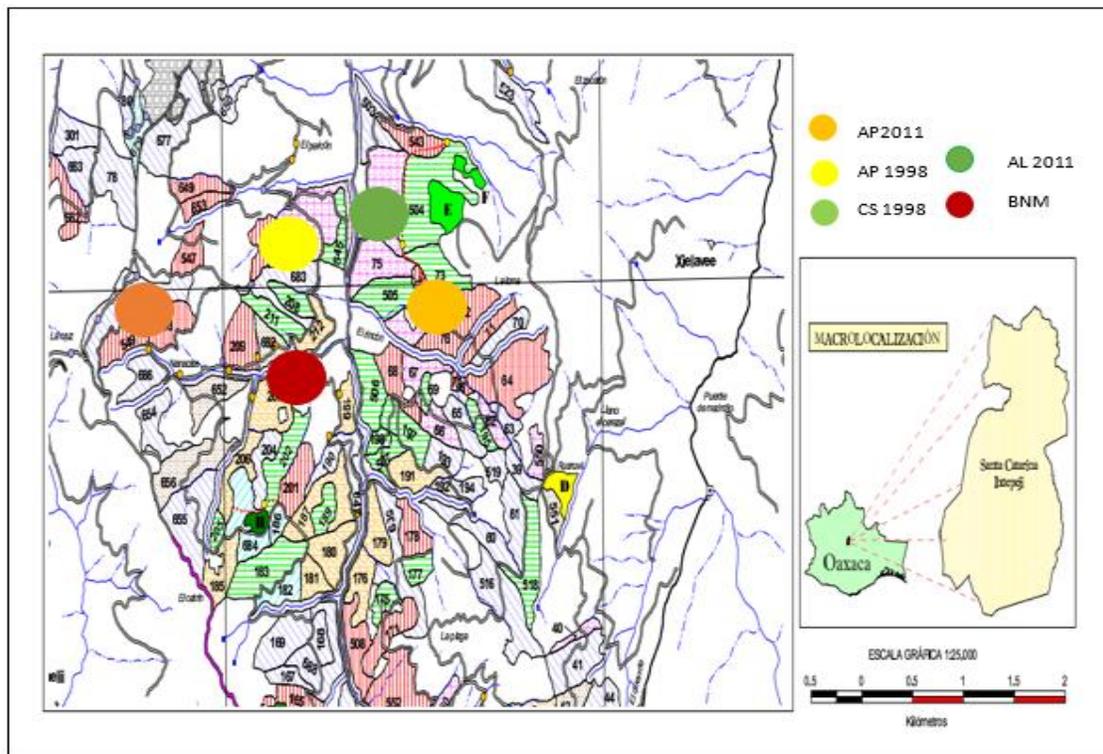


Figura 2.2. Área bajo manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca con los sitios de muestreo establecidos en campo (marcados con puntos AP= Árboles Padre, CS= Cortas de Selección, AL= Aclareo Ligero, BNM= Bosque No Manejado).

Sistema de muestreo

La intensidad de muestreo se determinó para cada tratamiento silvícola evaluado con la fórmula siguiente:

$$n = \frac{NZ^2Z_{\alpha/2}^2S_n^2}{Nd^2 + Z_{\alpha/2}^2S_n^2}$$

Donde:

n = Tamaño de muestra

N = Tamaño de la población (tamaño del rodal en ha)

S_n^2 = Varianza de una muestra preliminar de tamaño n

d = Error absoluto máximo deseado

$Z_{\alpha/2}$ = Valor de Z, normal estándar, según $(1 - \alpha)$ 100%

Una vez obtenido el número de sitios a muestrear (Cuadro 2.1) la distribución de éstos se realizó de manera aleatoria a través de una malla de puntos para cada uno de los rodales seleccionados (Figura 2.2).

Con el fin de tener información de referencia en sitios sin manejo, se eligieron 6 sitios cercanos con características similares principalmente en la composición arbórea con dominancia de *Pinus oaxacana*, además de altitud, pendiente y exposiciones similares a las áreas con tratamiento silvícola.

Cuadro 2.1. Sitios muestreados para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

CICLO DE CORTA 2008-2018				ERROR
				0.2
Anualidad	Rodal	Superficie (ha)	Tratamiento Silvícola	Número de sitios de muestreo
2 (2010-2011)	647	7.333	ÁRBOLES PADRE	6
2 (2010-2011)	683	12.57	ÁRBOLES PADRE	8
2 (2010-2011)	684	11.27	ÁRBOLES PADRE	8
Total				22
2 (2010-2011)	543	7.14	ACLAREO LIGERO	6
2 (2010-2011)	548	9.43	ACLAREO LIGERO	7
2 (2010-2011)	549	8.09	ACLAREO LIGERO	6
Total				19
CICLO DE CORTA 1998- 2008				
1 (1998-1999)	148	4.96	CORTAS DE SELECCIÓN	4
1 (1998-1999)	180	8.16	CORTAS DE SELECCIÓN	6
1 (1998-1999)	181	4.16	CORTAS DE SELECCIÓN	3

			Total	13
1 (1998-1999)	202	7.68	ÁRBOLES PADRE	6
1 (1998-1999)	208	3.36	ÁRBOLES PADRE	3
1 (1998-1999)	209	8.32	ÁRBOLES PADRE	6
			Total	15

Establecimiento de sitios de muestreo

Dentro de cada uno de los rodales correspondiente a cada tratamiento silvícola se establecieron sitios circulares anidados de 400 m² (radio de 11.28 m) en donde se midieron todos los árboles; en forma concéntrica se establecieron sitios de 200 m² (radio de 7.97 m), en el cual se midieron los arbustos; y dentro de estos sitios y en las cuatro orientaciones francas, se establecieron sitios de 1 m² ubicados de manera sistemática a 7 m del centro de cada sitio en sentido de las manecillas del reloj, en éstos se midieron todas las especies herbáceas (Figura 2.3).

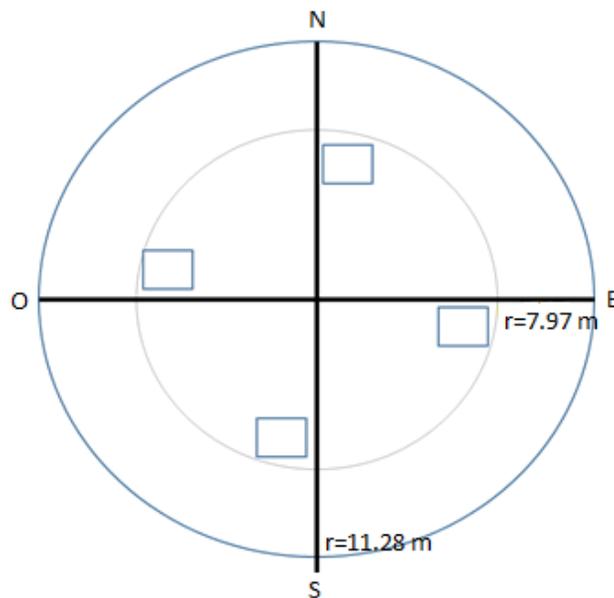


Figura 2.3. Esquema para el establecimiento de sitios de muestreo en cada uno de los rodales evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

Toma de datos

En los sitios de 400 m² se midió el diámetro a 1.3 m con cinta diamétrica y la altura total de todos los árboles con clinómetro Sunnto. El diámetro mínimo fue 2.5 cm. Así mismo, se registró la especie correspondiente.

Los arbustos se midieron en los sitios de 200 m², considerando como arbusto a todos las especies leñosas que presentaban ramificaciones desde la base del fuste. Para cada uno, se registró la especie, la altura total y la cobertura de copa en las orientaciones NS y EW para posteriormente obtener un promedio de cobertura. Dentro de estos sitios y, con el fin de complementar la información sobre regeneración de especies arbóreas, se registraron aquellos individuos con diámetro menor a 2.5 cm y altura menor o igual a 1.30 m.

En el cuadro de 1m² se midió la cobertura en porcentaje relativo de las diferentes especies herbáceas y su altura promedio.

En el bosque no manejado se realizaron 6 sitios de muestreo y también se midieron los árboles, arbustos y herbáceas con el mismo procedimiento descrito para las áreas bajo manejo.

Identificación de especies

Para determinar la composición de especies presentes en cada uno de los tratamientos silvícolas y en las áreas no manejadas, se colectaron ejemplares botánicos que presentaran estructuras vegetativas, sexuales y/o frutales. Las colectas se llevaron a cabo en las zonas aledañas a los sitios muestreados, tratando de no interferir con las condiciones en que se encontraban los sitios de muestreo; los ejemplares colectados se depositaron en bolsas de plástico para su traslado y su posterior herborización; para la determinación taxonómica fueron llevadas al herbario del Colegio de Postgraduados para su identificación.

De manera complementaria se tomó información general del sitio como: pendiente del terreno, exposición, altura sobre el nivel del mar, número del rodal al que corresponde el sitio, anualidad y tratamiento silvícola al que correspondía.

2.6.3 Análisis de información

Los datos de campo se capturaron en una hoja de cálculo de Excel (Microsoft Office, 2013) generando una base de datos por cada tratamiento silvícola dentro de estos se clasificó por rodal en cada una de las dos anualidades evaluadas; se consideró la forma de vida de todos los individuos, las variables dasométricas y la información general de cada sitio de muestreo, para poder realizar los análisis de estructura y composición de las especies en el área de estudio.

Una vez generada la base de datos por tratamiento silvícola y forma de vida, se calculó el número de especies por hectárea para cada tratamiento silvícola; así mismo, se calculó el número de individuos por formas de vida para cada tratamiento silvícola graficando los resultados. Para los índices de diversidad se generó una base de datos de las especies por tratamiento silvícola, haciendo una extrapolación a la hectárea, posteriormente se calcularon los índices alfa y beta con el programa Species Diversity y Richness 4 Ver. 2007 (Seaby y Henderson, 2006).

Se calculó la curva de acumulación de especies, ésta muestra el número de especies acumuladas, al aumenta el esfuerzo de muestreo en un sitio la riqueza aumenta hasta llegar a un momento donde el número de especies se estabiliza a una asíntota (Moreno 2001 y Del Rio *et al.*, 2003), lo cual es útil para asegurar que la superficie muestreada capta la mayor riqueza del sitio.

Se realizó un análisis estadístico no paramétrico de Kruskal-Wallis (Wheater y Cook, 2005) para la densidad y área basal, así como también para los índices de diversidad alfa, el índice de Shannon-Wiener, el índice de Simpson, el índice de Margalef y el índice alfa de Fisher, bajo la hipótesis nula de igualdad de medias;

posteriormente las diferencias entre tratamientos y formas de vida se realizó una comparación de medias.

Distribución de diámetro y alturas

Para obtener la distribución de diámetro y altura se construyeron histogramas de frecuencias en base al diámetro normal con intervalos de 5 cm y de altura total también con intervalos de 5 m. Lo anterior se realizó para cada tratamiento silvícola y el bosque sin manejo.

Índice de valor de importancia

El Índice de Valor de Importancia (IVI): fue desarrollado por Curtis y McIntosh (1951). Es un índice sintético estructural, desarrollado principalmente para jerarquizar dominancia de cada especie en rodales mezclados y que permite evaluar el peso ecológico de cada especie dentro del ecosistema analizado y se calcula de la siguiente manera:

$$IVI = \frac{\text{Dominancia relativa} + \text{Densidad relativa} + \text{Frecuencia relativa}}{3}$$

La dominancia (estimador de biomasa: área basal ó cobertura) relativa se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Dominancia relativa} = \frac{\text{Dominancia absoluta por especie}}{\text{Dominancia absoluta de todas las especies}} \times 100$$

Dónde:

$$\text{Dominancia absoluta} = \frac{\text{Área basal de una especie}}{\text{Área muestreada}}$$

El área basal de los árboles se obtuvo de la fórmula siguiente:

$$\text{Área basal } AB = \pi\left(\frac{DN^2}{4}\right)$$

También se calculó la densidad relativa:

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{Densidad absoluta por especie}}{\text{Densidad absoluta de todas las especies}} \times 100$$

Donde la densidad absoluta se obtiene:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{número de individuos de una especie}}{\text{número de individuos total}}$$

La frecuencia relativa se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Frecuencia relativa} = \frac{\text{Frecuencia absoluta por especie}}{\text{Frecuencia absoluta de todas las especies}} \times 100$$

Donde la frecuencia absoluta se obtiene de:

$$\text{Frecuencia} = \frac{\text{número de sitios en los que se presenta cada especie}}{\text{Número total de sitios muestreados}}$$

El IVI se calculó para los árboles y para todos los tratamientos silvícolas evaluadas y el bosque sin manejo.

Composición florística

Para determinar la composición florística del área en estudio se identificaron todas las especies a nivel de familia, género y especie; se obtuvo una matriz de familias,

género y especie por tratamiento silvícola y anualidad dentro del bosque con manejo y el bosque sin manejo. Se consultaron los diferentes trabajos sobre composición florística realizados en la zona de estudio, además de expertos locales y verificación en el herbario del Colegio de Postgraduados.

Análisis de la diversidad florística

Los índices se calcularon para cada tratamiento silvícola y el bosque sin manejo usando los datos de especies y su abundancia a través del programa Species Diversity and Richness (4.1.2). Se obtuvieron los índices de Shannon-Wiener, Simpson, de Margalef y alfa de Fisher. Éstos se utilizaron porque en general consideran la riqueza de especies (variación) y su abundancia (Magurran, 1988; Moreno, 2001).

2.6.4. Índices de diversidad (diversidad alfa).

El análisis de la diversidad alfa se llevó a cabo para los bosques con manejo y sin manejo así como para los diferentes tratamientos silvícolas y anualidades, para cada forma de vida (árboles, arbustos y herbáceas) mediante los siguientes índices:

Índice de Shannon-Wiener

Este índice es una propuesta de cálculo derivado de la teoría de la información que combina riqueza y uniformidad (Moreno, 2001).

Se calcula a partir de la ecuación:

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

Dónde:

H = Índice de diversidad de Shannon-Wiener.

p_i = Proporción de individuos o abundancia relativa en la i-esima especie y se estima mediante n_i/N .

n_i = Total de individuos de la i-ésima especie

N = Número total de individuos muestreados

El valor del índice de Shannon-Wiener se ve afectado por la abundancia de la especie más común pero a pesar de esto es un índice aceptado en investigaciones de diversidad estructural (Magurran, 1988).

El índice de Shannon-Wiener considera que los individuos se muestrean al azar a partir de una población infinita y que todas las especies están representadas en la muestra; este índice combina riqueza y uniformidad. El intervalo para este índice se encuentra entre 1 y 5, es frecuente obtener valores entre 1.5 - 3.5 y en ocasiones sobrepase 4.5 (Margalef, 1972 y Moreno, 2001).

Índice de Simpson

Este índice se basa en la probabilidad de que los individuos tomados al azar pertenezcan a una misma especie. Este valor se encuentra entre 0 y 1 (Miranda, 1999).

Se calcula con la siguiente fórmula:

$$D = \left(\frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)} \right)$$

Dónde:

D = Índice de Simpson.

N_i = Número de individuos de la especie i .

N = Número total de individuos.

Al igual que el índice de Shannon-Wiener, el índice de Simpson considera tanto la uniformidad y la riqueza de especies. Es menos variable para el número de especies, pero se ve afectada por la abundancia de la especie más común. En este caso, se utilizó el inverso de Simpson (1/D) que explica que a mayor diversidad mayor es el índice y el valor máximo de éste puede ser la riqueza encontrada en la condición bajo estudio (Magurran, 1988; Moreno, 2001).

Índice de Margalef

Este índice combina el número de especies (S) y el número total de individuos, valores cercanos a 0 o a 1 hacen referencia a condiciones con poca diversidad y cercanos a 6 indican alta diversidad y se calcula de la siguiente manera:

$$D_{Mg} = \frac{S-1}{\ln N}$$

Donde:

S = Número de especies

N = número total de individuos

El índice transforma el número de especies por muestra a una proporción a la cual las especies son añadidas por expansión de la muestra. Supone que hay una relación funcional entre el número de especies y el número total de individuos (Moreno, 2001).

Índice alfa de Fisher.

Es un modelo de abundancia que permite realizar comparaciones entre datos de procedencias diversas y áreas heterogéneas, teniendo así que α es bajo cuando el número de especies es bajo y viceversa (Moreno, 2001; Zarco *et al.*, 2010) no se considera un intervalo de valores. Su valor se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$S = \alpha \ln[1 + (N/\alpha)]$$

Donde:

S = Número de especies en la muestra.

N = Número de individuos en la muestra.

Ln = Logaritmo natural.

α = Alfa de Fisher.

El índice de Fisher es independiente del tamaño de la muestra y no da excesivo peso a las especies más comunes de la muestra, a diferencia de los índices anteriores (Moreno, 2001).

2.6.5. Índices de semejanza florística (diversidad beta).

Los índices de diversidad beta presentan valores que van de 0 a 100, significando la menor o mayor semejanza respectivamente; valores cercanos a 100 indican mayor similitud florística (Moreno, 2001).

El análisis comparativo entre la diversidad específica o semejanza florística se realizó entre los diferentes tratamientos silvícolas y bosques sin manejo mediante los siguientes índices:

Índice de semejanza Jaccard (I_j).

Este índice relaciona las especies en común entre las suma de las especies de ambas condiciones menos las especies compartidas (Moreno 2001).

$$I_j = \frac{c}{a+b-c}$$

Donde:

a = Número de especies en el sitio A

b = Número de especies en el sitio B

c = Número de especies presentes en ambos sitios A y B

El rango de este índice va desde cero (0) cuando no hay especies compartidas, hasta uno (1) cuando los dos sitios comparten las mismas especies. Este índice mide diferencias en la presencia o ausencia de especies (Moreno, 2001).

Índice de semejanza Sorensen (I_s).

Relaciona el número de especies compartidas en ambas condiciones comparadas y se obtuvo con la siguiente fórmula (Moreno, 2001).

$$I_s = \frac{2c}{a+b}$$

Donde:

a = Número de especies en el sitio A

b = Número de especies en el sitio B

c = Número de especies presentes en ambos sitios A y B

Este índice relaciona el número de especies en común con respecto a todas las especies encontradas en los dos sitios (Moreno, 2001).

2.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.7.1 Estructura del bosque

Distribución de diámetro

La

muestra la representación del bosque con manejo en donde se presenta una menor cantidad de individuos en las primeras categorías diamétricas, aumentando en las intermedias y disminuyendo en las mayores. Ésta se asemeja a una distribución asimétrica positiva; en la Figura 2.5 se muestra la distribución de los bosques sin manejo donde la distribución se asemeja a una distribución bimodal,

es decir con dos máximos (Puumalainen, 1996; Condés, 1997; Hessen, 2001); esta distribución generalmente corresponde a la de un bosque mezclado donde aparecen dos o más estratos.

La estructura horizontal de acuerdo a la distribución diamétrica fue diferente en los bosques con manejo, presentando un mayor número de individuos en las categorías diamétricas, observándose un aumento a medida que la diamétrica disminuye, en los bosques con manejo en las primeras diamétricas se presentaron un mayor número de individuos; no fue así bosques sin manejo en donde se presentó un menor número de individuos primeras categorías, mientras que en las categorías de mayor diámetro, presentó un mayor número de individuos (

y Figura 2.5).

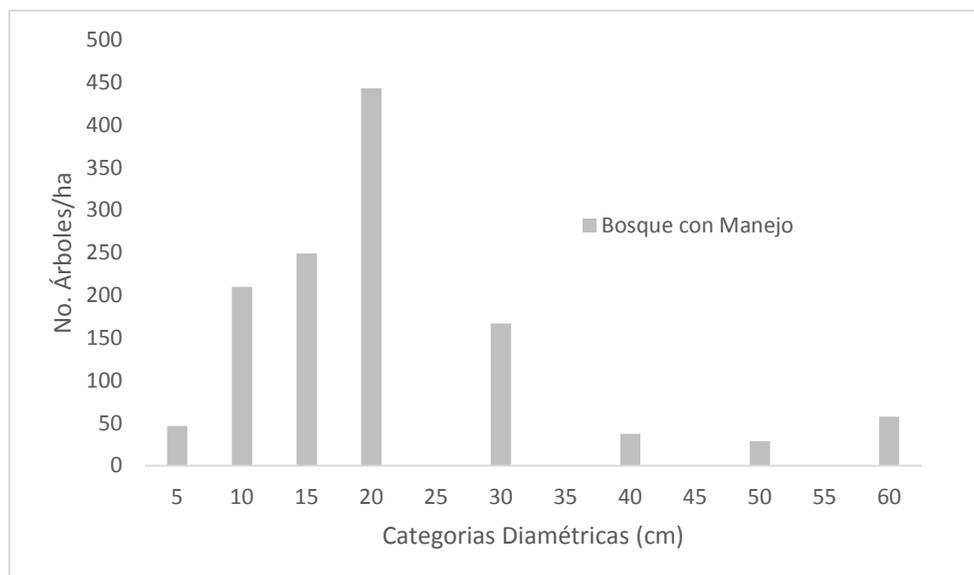


Figura 2.4. Distribución de las categorías diamétricas para las áreas con manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

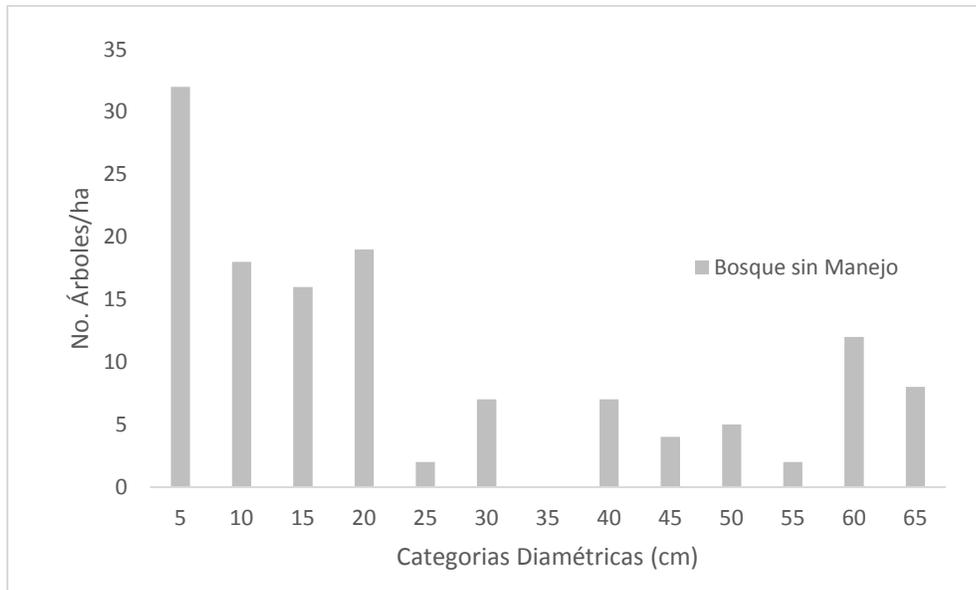


Figura 2.5. Distribución de las categorías diamétrica para las áreas sin manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

La distribución de los diámetros para los bosques con manejo en todos los tratamientos silvícolas se asemeja a una distribución con asimetría hacia la izquierda o positiva, en donde la mayoría de las categorías diamétricas se encuentran en las primeras etapas de desarrollo (Figura 2.6). Ajbilou *et al.*, 2003 encontró en un bosque de pino en Marruecos que las distribuciones fueron de tipo dos con una asimetría positiva, similar a la distribución que se encontró en el área de estudio. Otros estudios con resultados similares se han reportado en un bosque mesófilo de montaña en Jalisco, con mayor número de individuos en las primeras etapas de desarrollo (Sánchez *et al.*, 2003); y en bosques de selección individual (Ramírez, 2006), y selección en fajas (Vázquez, 2013).

Las distribuciones diamétrica pueden presentar diferentes formas dependiendo de la estructura del rodal o del efecto de los tratamientos silvícolas realizados (Álvarez *et al.*, 2002). De acuerdo con Philip (1994), el comportamiento de la estructura en bosques templados varía debido al requerimiento de luz que las especies forestales necesitan para crecer, misma que se modifica con la apertura del dosel. Por otro lado, la distribución diamétrica de árboles en bosques nativos jóvenes o en proceso de recuperación presenta una tendencia de J invertida, con

la mayor cantidad de individuos en las categorías diamétricas menores, disminuyendo el número de árboles a medida que aumenta la categoría diamétrica (Lamprecht, 1990; Hernández *et al.*, 2013).

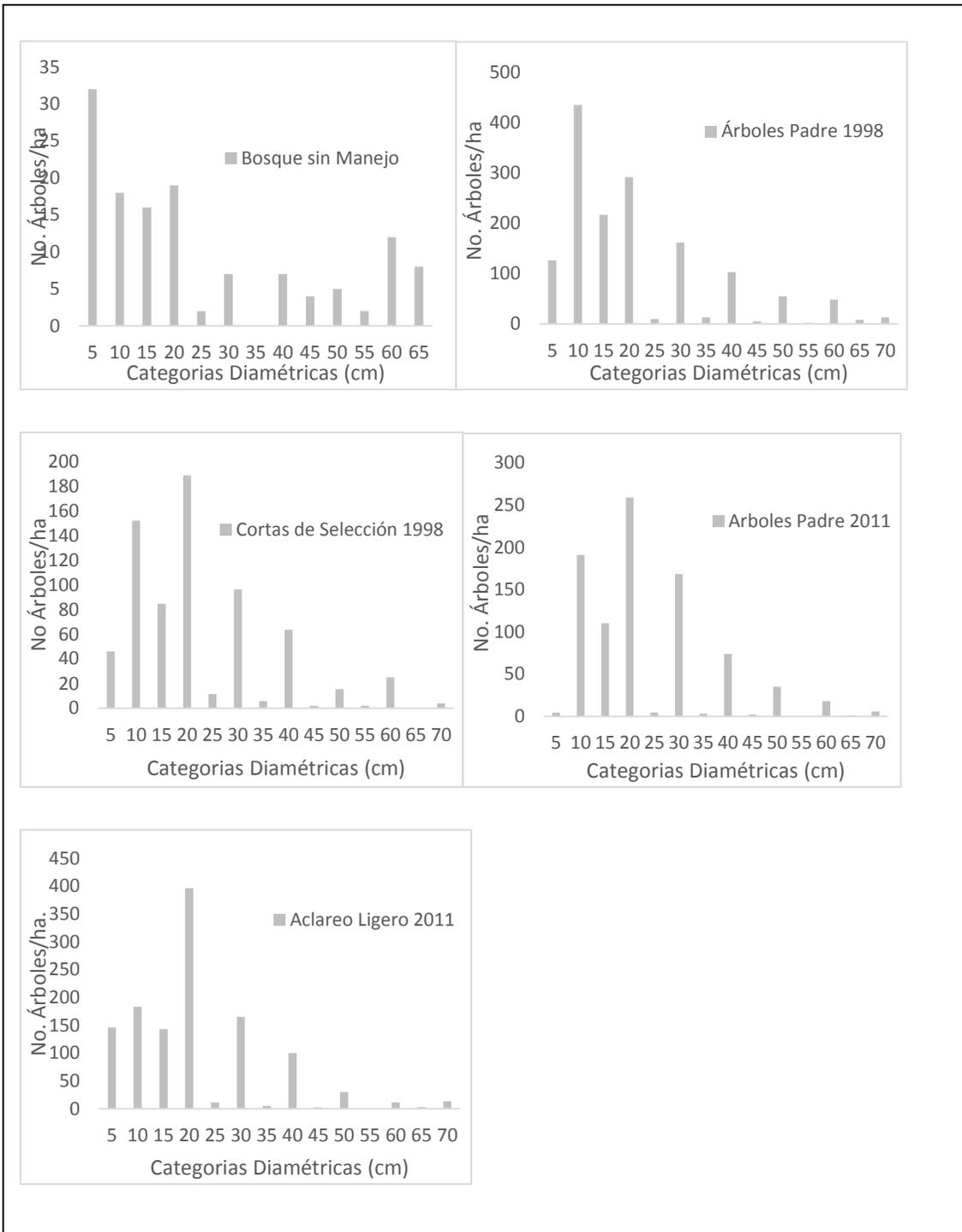


Figura 2.6. Distribución de las categorías diamétricas por tratamiento silvícola y en el bosque sin manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

Distribución de altura

La estructura vertical del bosque con manejo, presenta un patrón de una distribución normal en donde la mayoría de los individuos están en las etapas de desarrollo de brinzal y latizal. Lo anterior se puede explicar porque con la apertura de claros en el dosel, el tamaño de los claros y las condiciones de tolerancia varían de acuerdo a las especies encontradas en el sitio, en donde los pinos, que son especies que demandan más luz, propician la regeneración natural en los estratos inferiores. Lo anterior no se observó en el bosque sin manejo, ya que la mayor cantidad de árboles se presentó en las categorías de altura mayores (Figura 2.7, Figura 2.8).

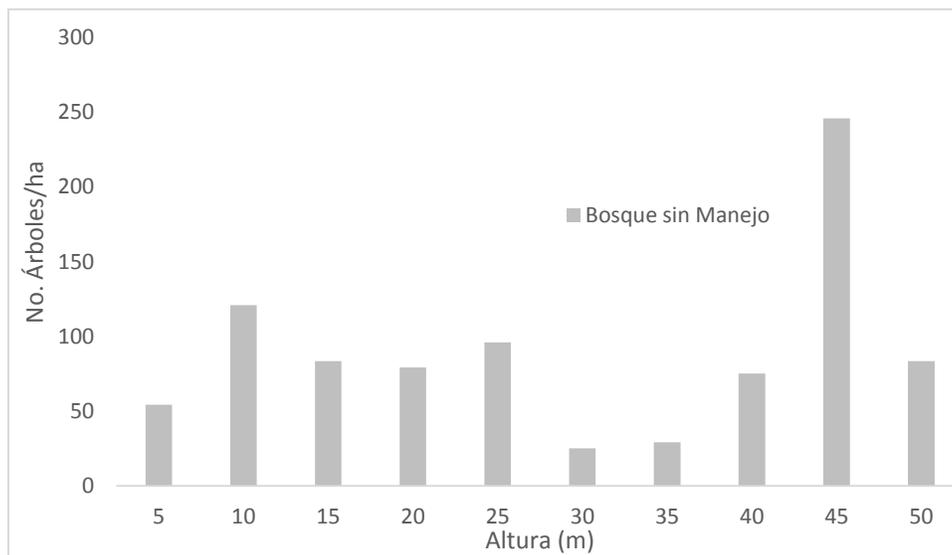


Figura 2.7. Distribución de alturas para el total de sitios muestreados en bosque sin manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

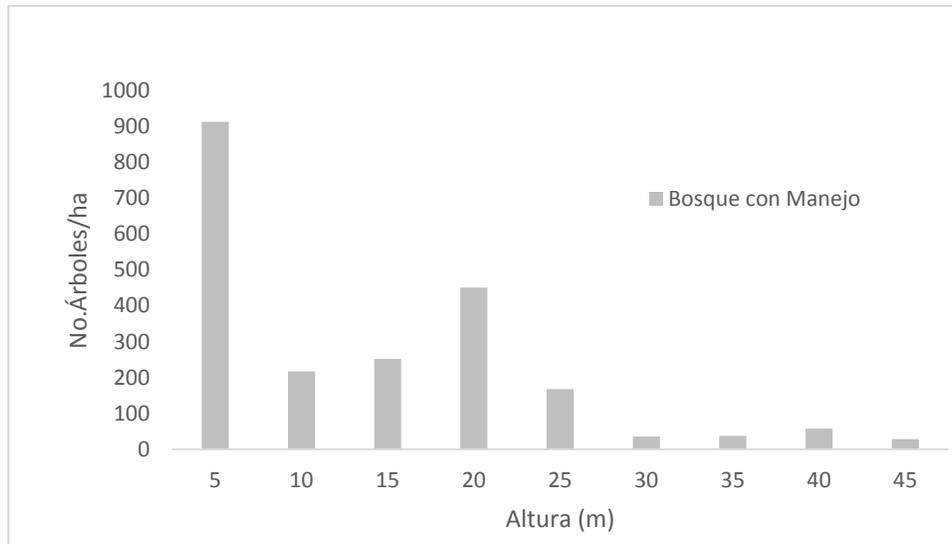


Figura 2.8. Distribución de alturas para el total de sitios muestreados en bosques con manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

La distribución en altura tuvo un comportamiento diferente en todos los tratamientos silvícolas. Para las cortas de selección y árboles padre de 1998 y árboles padre 2011 y cortas de selección de 2011, la distribución fue asimétrica positiva, donde la mayor frecuencia de alturas se presentó en las categorías diamétricas menores (Figura 2.9), mientras que el bosque sin manejo, la tendencia fue diferente en relación a los demás tratamientos, en éste en particular, las alturas de los árboles son mayores (Figura 2.9). Para los tratamientos silvícolas de cortas de selección y árboles padre 1998, se registró un mayor número de individuos en alturas de 10 a 20 m.

Con relación a la distribución de alturas en los bosques sin manejo, predominan los árboles de 45 m de altura, casi el doble que la frecuencia de árboles entre 5 y 40 m de altura, con excepción de los árboles de 50 m. La altura de los árboles es mayor en los bosques sin manejo de acuerdo a Brokaw y Lent (1999). La diferencia de tamaños en altura pudiera ser el resultado de una competencia y/o de una mezcla de especies, estas diferencias determinan la variación espacial en condiciones de microambiente, Mostacedo (2000) menciona que al realizar la apertura de un claro se generan condiciones para que las especies puedan desarrollarse en altura.

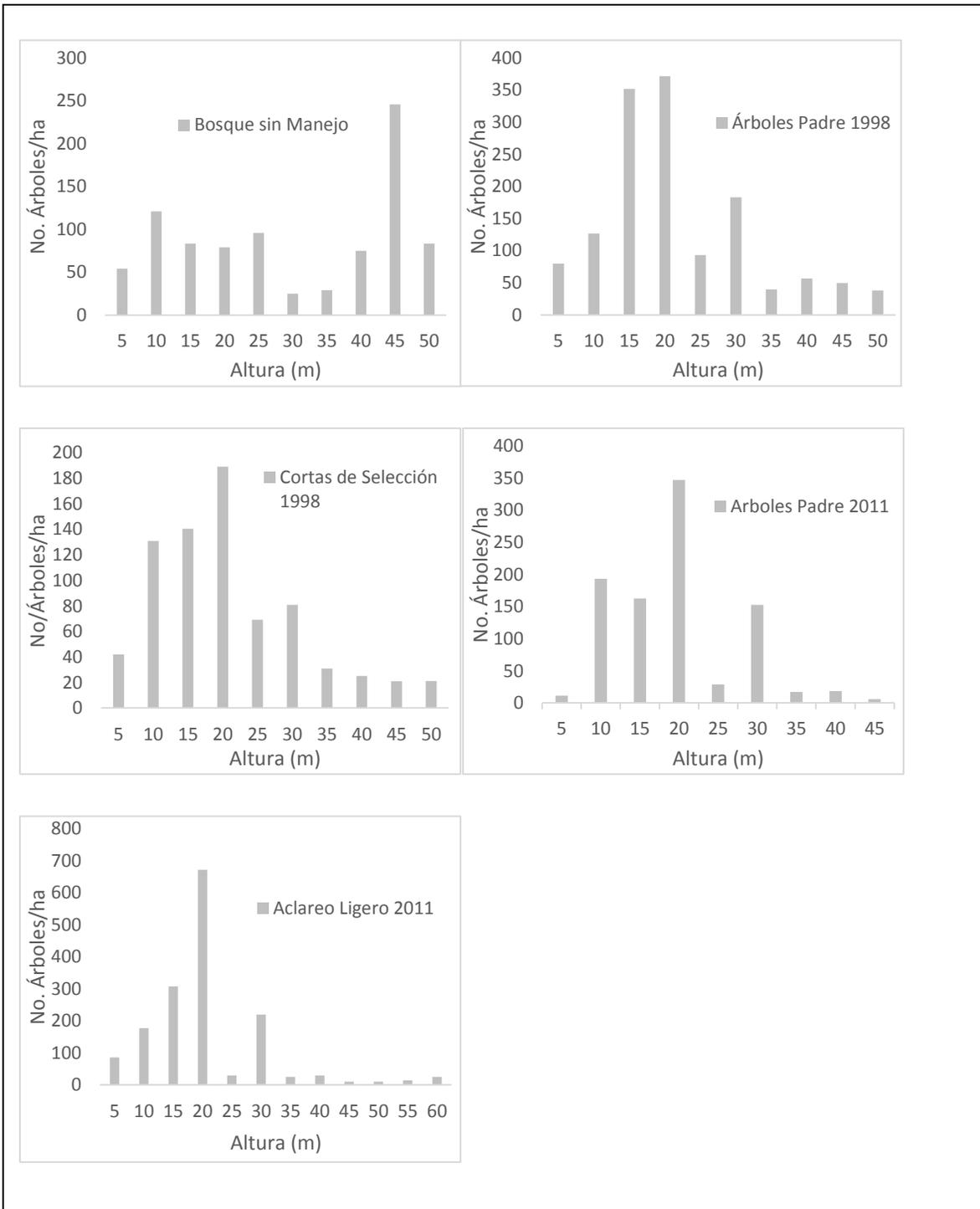


Figura 2.9. Distribución de las categorías de altura por tratamiento silvícola y bosque sin manejo evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oax.

En el Cuadro 2.2 se presentan las medias de los atributos estructurales para todos los individuos con diámetros a la altura del pecho mayores a 2.5 cm en todos los tratamientos silvícolas evaluados, se aprecia que los valores de densidad son mayores para el bosque sin manejo y para el aclareo ligero 2011. En el caso del área basal, el bosque sin manejo presenta el mayor valor lo cual se puede explicar porque en esta condición se presentaron los árboles con mayores diámetros. En general, el bosque sin manejo se presentó los mayores valores para densidad y área basal.

Cuadro 2.2. Comparación de medias del área basal promedio y densidad promedio por tratamiento silvícola en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

TRATAMIENTO SILVÍCOLA	Densidad (N ha ⁻¹)	E.E	Área Basal (m ² ha ⁻¹)	E.E.
AL 11	103 ^{ab}	3.81	1.61 ^a	0.91
AP 11	54 ^a	4.13	3.10 ^b	1.04
AP 98	57 ^{bc}	5.46	4.07 ^b	1.33
CS 98	68 ^a	2.47	2.98 ^b	1.16
BNM	125 ^c	3.34	18.83 ^c	1.22

AL= Aclareo Ligero, AP= Árboles Padre, CS= Cortas de Selección, BNM= Bosque sin Manejo, E.E= Error Estándar (Medias seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$ suma de rangos de Wilcoxon))

2.7.2 Índice de valor de importancia

El índice de valor de importancia (IVI) por especie y tratamiento se presentan en la Figura 2.10. El *Pinus oaxacana* presenta los valores más altos de IVI (56.9%) y 58.9% para los tratamientos de árboles padre 2011 y aclareo ligero 2011, respectivamente. El *Quercus rugosa* presenta un 14.3% en cortas de selección de 1998 y árboles padre 2011; y 10.9% en aclareo ligero 2011, mientras que el *Quercus magnifolia* presentó valores de 15.9%, 14.2% y 13.2%, para los de árboles padre 1998, árboles padre 2011 y cortas de selección 1998, respectivamente. Para el caso de la especie *Persea longipes*, ésta presentó IVI's de 12.2% en árboles padre 1998 y 11.7% en bosque sin manejo, mientras que *Litsea glauscences* se presenta únicamente en los bosques sin manejo con un valor de 9.2%, por lo que se puede concluir que esta especie disminuye cuando las

áreas están sujetas a manejo silvícola, aumentando su presencia en el mediano plazo.

Algunos estudios han reportado una tendencia similar en bosques de clima templado (Alanís *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2013; Vázquez, 2013), reportándose en el noreste de México valores de IVI superiores al 80% para pino y menores al 50% para encino, después de la aplicación de tratamientos silvícolas (Hernández *et al.*, 2013) y valores de 71.3% y 50% para árboles de los géneros *Quercus* y *Pinus*, respectivamente, después de un incendio (Alanís *et al.*, 2011). Los estudios anteriores indican que por ser especies heliófilas, estas se regeneran como resultado de la apertura de claros que promueven mayor entrada de luz. Por otro lado, en relación a la diversidad de especies, cuando esta es abundante, existen muchas que son redundantes (Louman *et al.*, 2001), por lo que una reducción en la población de una especie, puede ser compensada con el aumento en la población de otra con la misma función (Molina y Finegan, 2002; Zarco, 2007; Leyva *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2013).

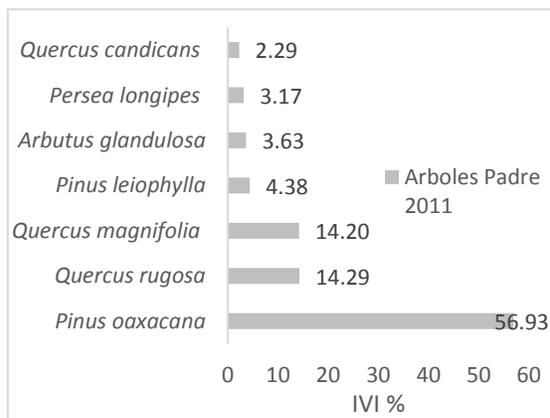
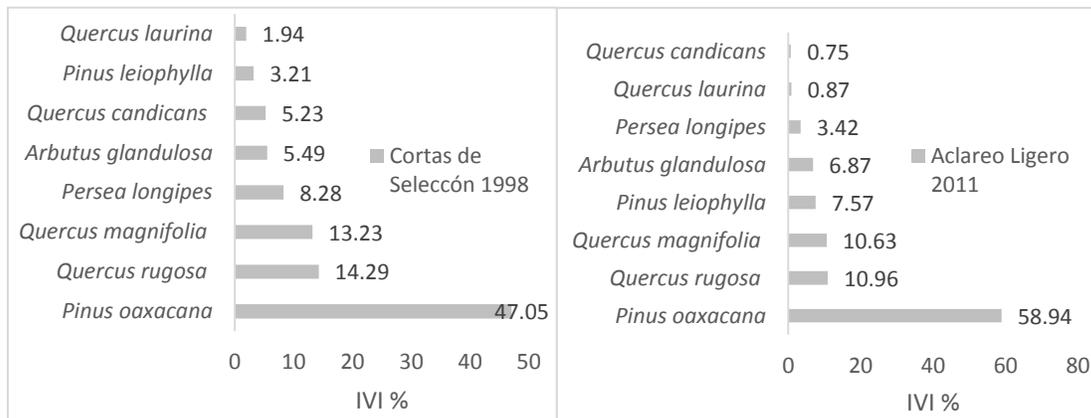
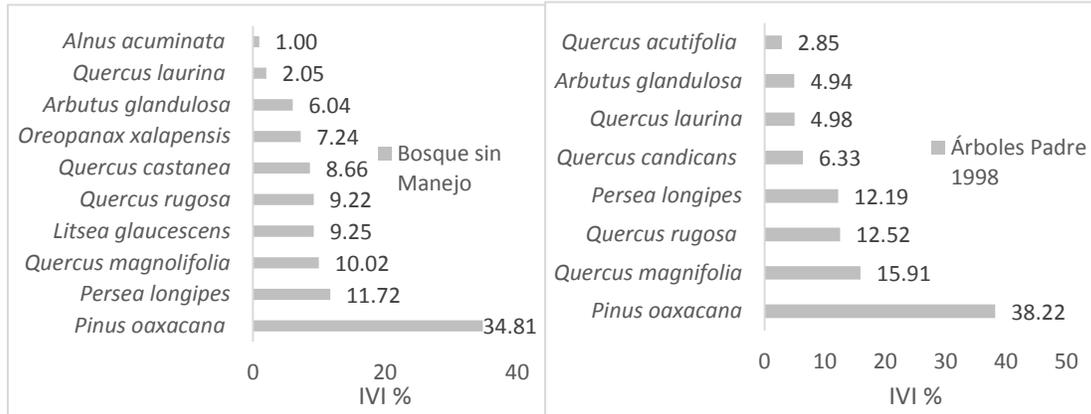


Figura 2.10. Índice de Valor de Importancia (IVI) entre los diferentes tratamientos silvícolas evaluados y el bosque sin manejo evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

2.7.3 Composición florística

En el área bajo estudio se registraron 43 especies pertenecientes a 31 géneros y 25 familias (Anexo 1). En el bosque sin manejo se registraron 30 especies pertenecientes a 28 géneros y 20 familias en donde las familias con mayor número de especies fueron la Asteraceae (6), la Fagaceae (5) y la Lauracea (2) (Figura 2.11); la familia más representativa y con el mayor número de individuos en las dos condiciones fueron la Pinaceae, la Fagaceae y la Lauraceae.

Para los bosques con manejo se encontraron 41 especies; pertenecientes a 31 géneros y 25 familias (Anexo 1). Las familias con mayor riqueza de especies fueron la Asteraceae (8), la Fagaceae (5) y la Fabaceae (4) (Figura 2.12); así mismo, se presentaron familias con una menor riqueza de especies, pero con una frecuencia en todos los sitios muestreados, siendo estas la Pinaceae y la Lauraceae, y las especies con mayor frecuencia fueron *Pinus oaxacana* y *Persea longipes*.

Los resultados hacen suponer que la riqueza de especies presentes en cada uno de los tratamientos evaluados, cambió en función de los tratamientos aplicados y de la intensidad de manejo; sin embargo, las familias Fagaceae, Asteráceae y Pinaceae (Figura 2.13), estuvieron presentes en todos los tratamientos evaluados. La familia Fabaceae se presentó con una mayor cantidad de especies en las cortas de selección (1998), lo que no ocurrió para los demás tratamientos. La especie *Litsea glauscescens* se presentó en las cortas de regeneración por árboles padre (1998), en donde después de 13 años, la especie se recupera y nuevamente comienza a formar parte del ecosistema; así mismo, esta especie estuvo presente en los bosques sin manejo donde se encuentra bajo protección.

La composición florística de los ecosistemas templados en el estado de Oaxaca varía según la región, estos pueden estar compuestos exclusivamente árboles del género *Pinus* o bien comparten hábitats con especies de otros géneros como el *Quercus* y el *Alnus* (Del Castillo *et al.*, 2004). El estrato principal de estos bosques

está compuesto por árboles de 5 a 20 m o superiores, donde dominan los géneros *Pinus* y *Quercus*.

El estrato arbustivo contiene ejemplares de 2 a 3 m de altura, con dominancia de las familias Fagaceae, Asteraceae y Fabaceae. Algunos estudios que reportan resultados similares son los de Zacarías y Del Castillo (2010), quienes encontraron a través de un gradiente altitudinal, que la composición florística está constituida por 19 familias y 35 géneros; las familias con mayor riqueza de especies fueron la Fagaceae, la Asteraceae y la Fabaceae. Castellanos *et al.* (2008), reportan para Ixtlán de Juárez, en diferentes condiciones silvícolas, que las familias más representativas fueron la Pinaceae y la Fagaceae, en esta misma comunidad, Vázquez (2013), reportó que las familias con mayor dominancia, después de realizar cortas de selección fueron la Fagaceae, la Asteraceae y la Pinaceae. En general, los bosques de clima templado de pino presentan dominancia de este género y su mezcla principal es con el género *Quercus*, característica principal del bosque natural en esta zona (Del Castillo *et al.*, 2010).

De las 43 especies encontradas en el área muestreada, las especies *Alnus acuminata*, *Quercus laurina*, *Pinus leiophylla* y *Pinus oaxacana* son endémicas de México (García y Meave, 2011): En los bosques sin manejo y en el tratamiento silvícola de árboles padre 1998, se encontró la especie *Litsea glauscescens*, esto pudiera interpretarse que, después de un periodo de tiempo de haber realizado manejo, la especie se presenta nuevamente. Es importante aclarar que ésta especie en particular, está catalogada dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-ECOL-059-2010, como en peligro de extinción.

La familia Fagaceae fue la que presentó un mayor número de especies, considerando que en el área de estudio predominan los bosques de pino-encino; así mismo, la familia Asteraceae presentó un mayor número de especies en los bosques sin manejo; sin embargo, la frecuencia de esta familia fue mayor en los bosques con manejo. De acuerdo a Villaseñor (2010), algunos géneros de esta

familia son indicadores de perturbación; adicionalmente, en el estado de Oaxaca, se cuenta con un alto número de endemismos de ésta familia.

La recuperación de las especies del bosque bajo manejo depende de la intensidad de los tratamientos aplicados, mismos que modifican el tamaño de apertura del dosel (Musálem y Fierros, 1996) y que modifican los factores ambientales como la precipitación, la radiación solar y la temperatura (Aus der Beek y Sáenz, 1992).

2.7.4 Formas de vida

Las Figura 2.14 muestra la distribución de las formas de vida para los bosques con manejo, en donde se aprecia que existe un mayor número de individuos para la forma de vida de los árboles, seguido de los arbustos, mientras que para los bosques sin manejo se presentó mayor número de árboles, mientras que el número de herbáceas y arbustivas fue similar, lo anterior pudiera considerarse natural, ya que en teoría, los bosques sin manejado promueven una mayor diversidad de formas de vida y una mayor estratificación vertical.

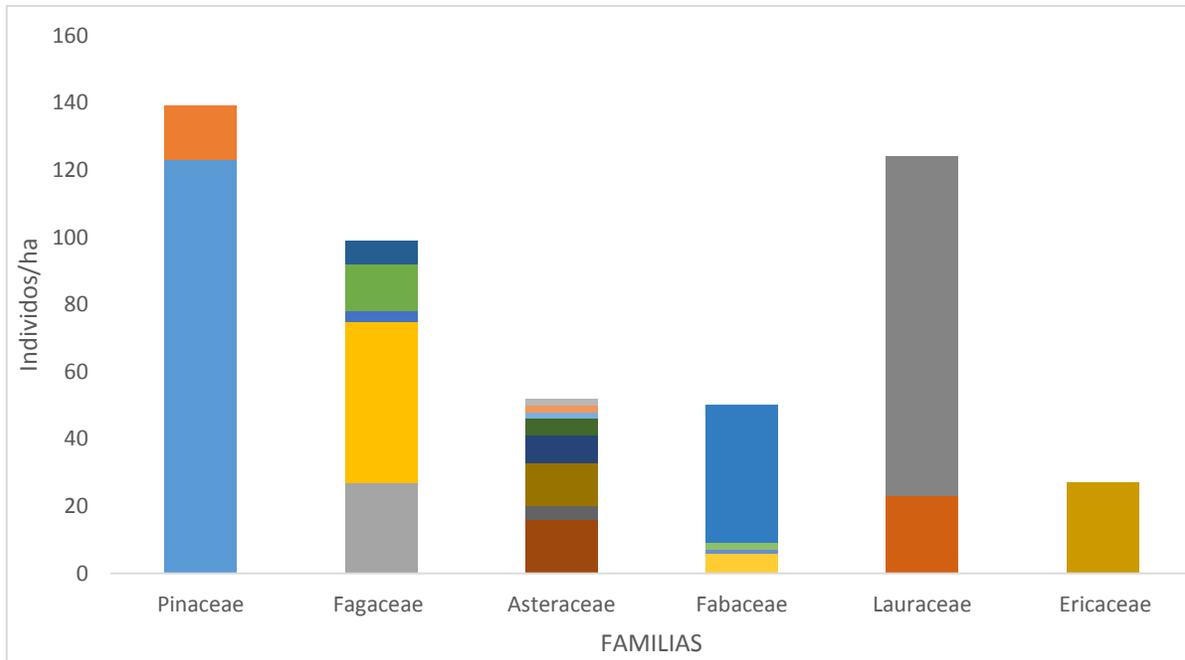


Figura 2.11. Familias presentes en el bosque sin manejo en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. (Los colores indican géneros dentro de cada familia).

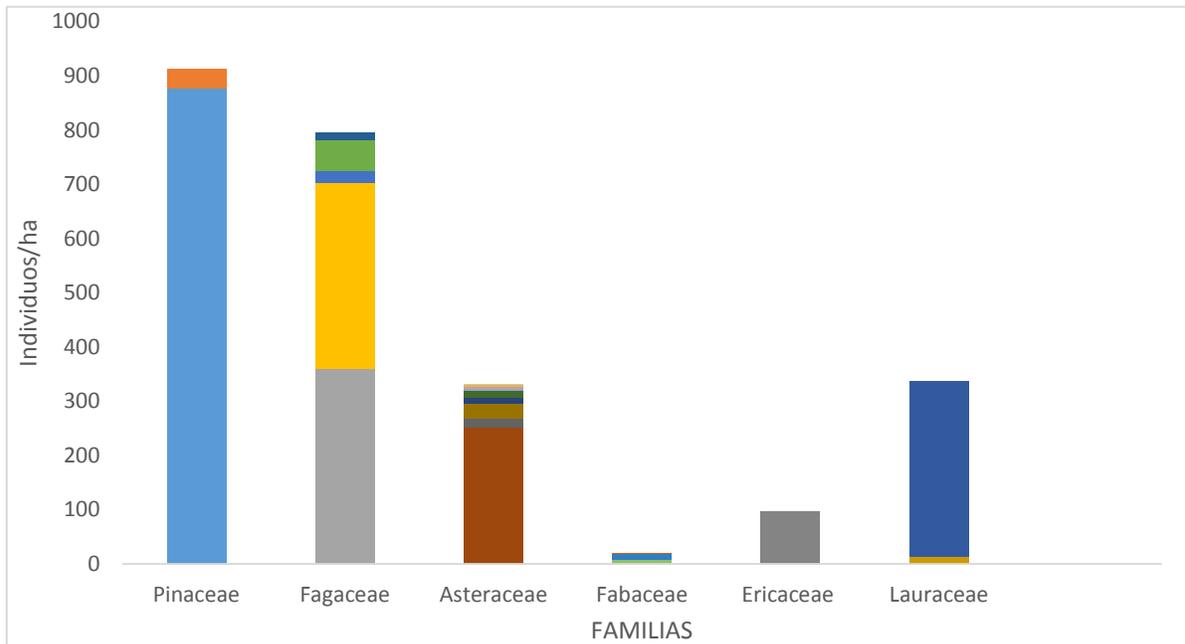


Figura 2.12. Familias presentes en el bosque con manejo en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. (Los colores indican géneros dentro de cada familia).

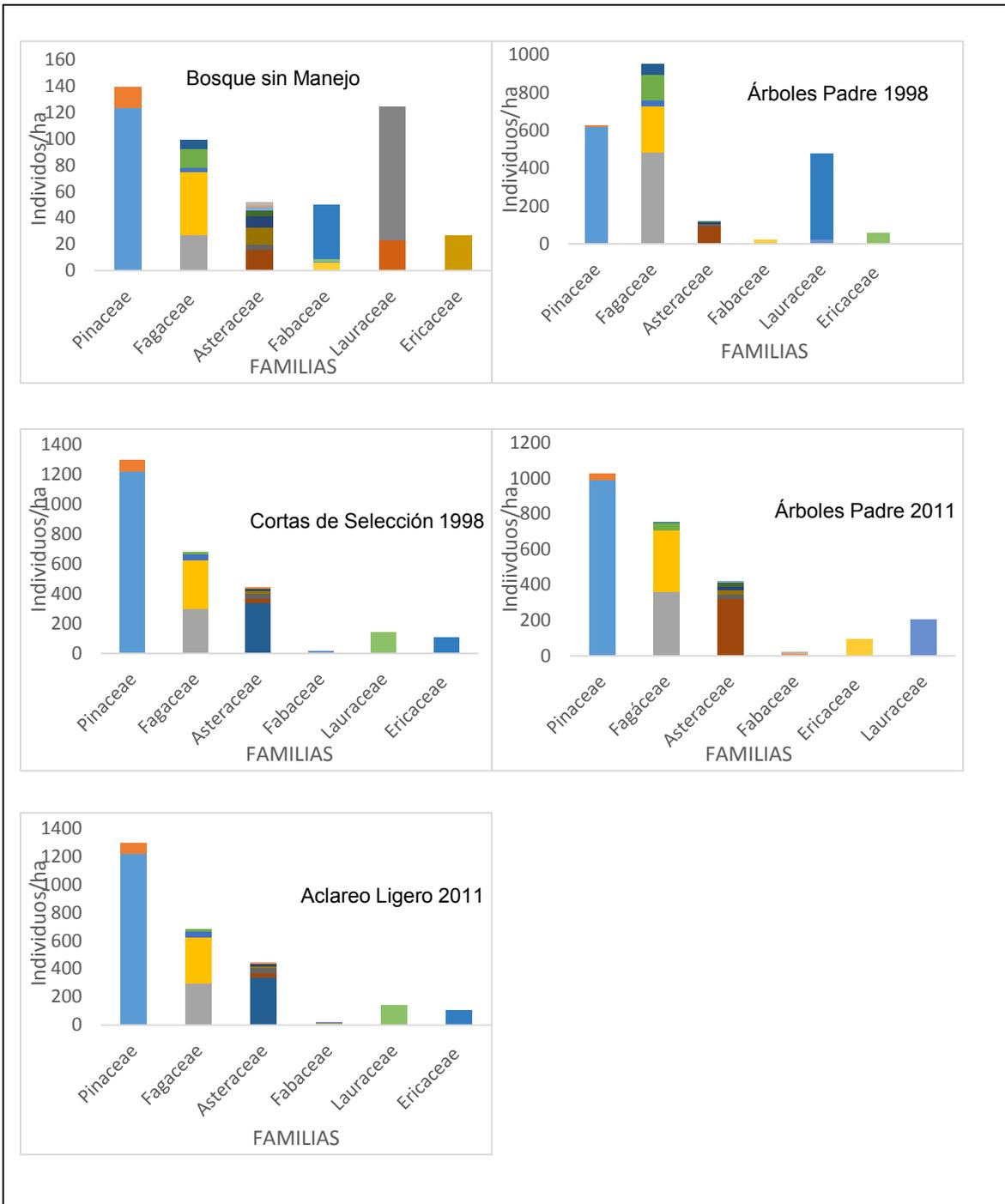


Figura 2.13. Familias presentes para cada uno de los tratamientos evaluados en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji Oaxaca (Los colores indican géneros dentro de cada familia).

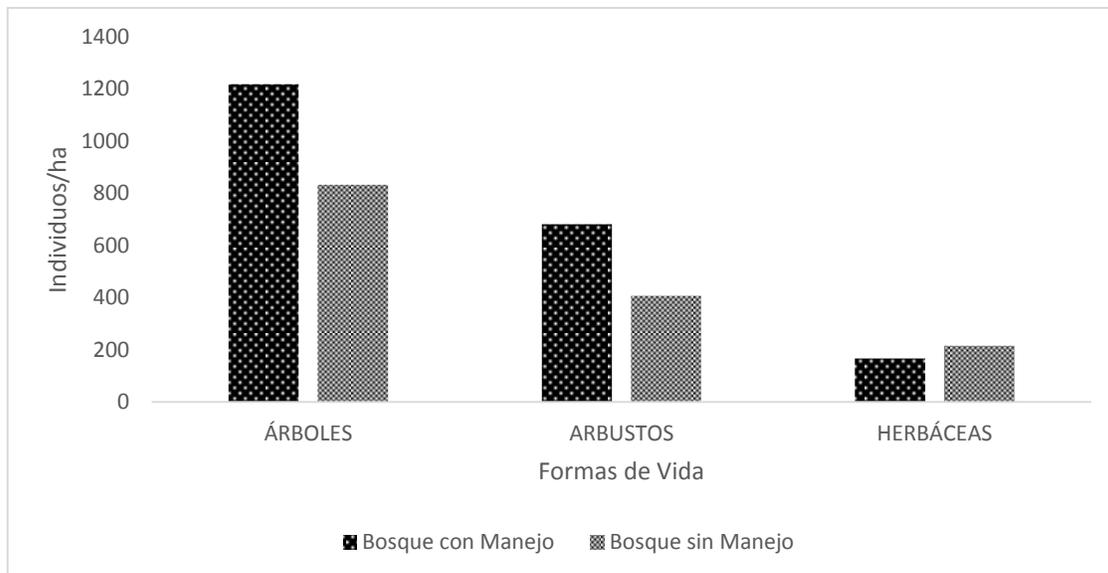


Figura 2.14. Distribución de las formas de vida para los bosques con y sin manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

Con relación a este atributo, los árboles como forma de vida se presentaron en mayor número en los tratamientos silvícolas de árboles padre 1998 y 2011, mientras que los arbustos se presentaron en mayor cantidad en los tratamientos de aclareo ligero 2011 y árboles padre 1998 y 2011. Por otro lado, las herbáceas tuvieron un mayor número de individuos por hectárea en los bosques sin manejo en comparación con los demás tratamientos silvícolas, en donde fue similar (Figura 2.155). En comparación García *et al.* (2010), reportan que para zonas de alto valor de conservación y en zonas de baja diversidad arbórea, sobresalen las especies arbustivas como las más representativas. En Santa Catarina Ixtepeji se reportan a las especies arbustivas como dominantes a menores altitudes, debido a las diferentes condiciones de clima, mientras que los árboles dominan al aumentar la altitud todas las áreas estudiadas (Zacarías y Del Castillo, 2010).

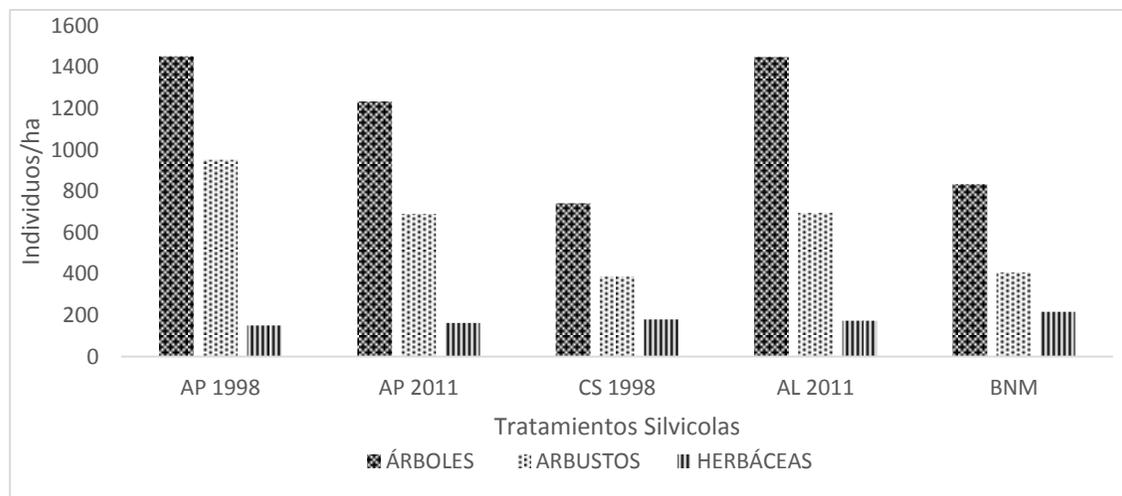


Figura 2.155. Distribución de las formas de vida para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

2.7.5 Índices de diversidad

Gráfica de acumulación de especies

En la Figura 2.166 se muestra que la curva de acumulación de especies por tratamiento silvícola presenta una aproximación a una asíntota para todos los tratamientos silvícolas evaluados. Lo que en general se logra a los 11 y 14 sitios de muestreo, lo cual se cumple en todos los tratamientos analizados en este trabajo. En bosque sin manejo se establecieron menos sitios, pero aun así se logra obtener una buena representación de las especies.

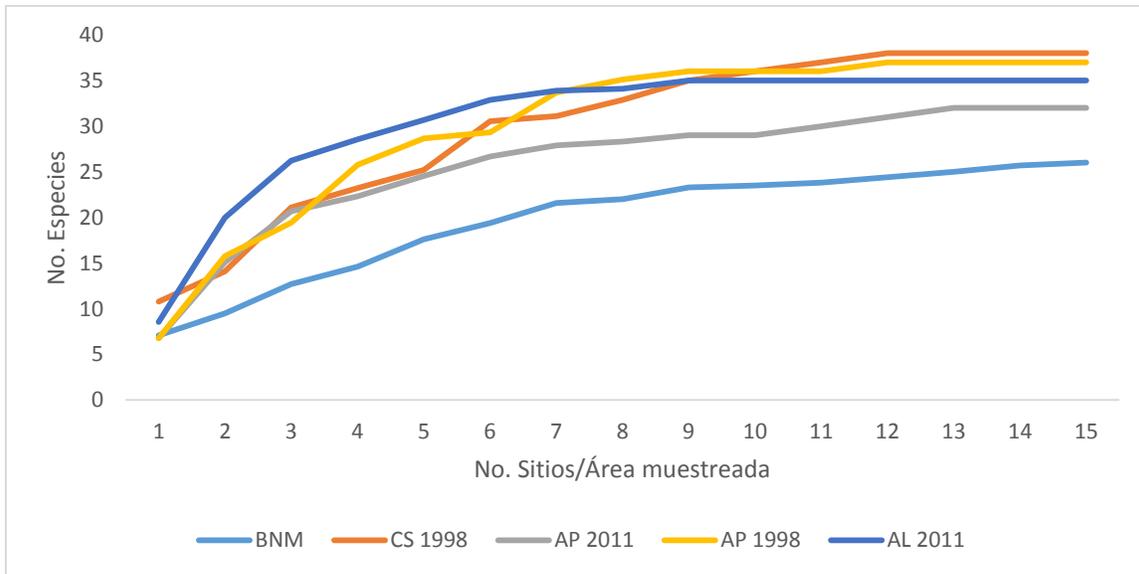


Figura 2.166. Gráfica de acumulación de especies para los diferentes tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

Diversidad alfa

Para la diversidad alfa se encontró una mayor diversidad de especies herbáceas en los bosques sin manejo (Cuadro 2.23), Hernández *et al.* (2013) reportan para un bosque en el ejido El Largo, Durango, que el manejo forestal modificó la diversidad alfa, en donde se mantuvo la riqueza de especies pero se presentó una disminución en los índices de Margalef y Shannon-Wiener. A nivel género, el *Pinus* aumentó los valores de dominancia y abundancia. Nava y González (2009) reportan que la diversidad disminuye con el aumento del área basal removida; la remoción del 100% se tradujo en la colonización de las parcelas con *Pinus cooperi*, mientras que en sitios con menores porcentajes de remoción, el *Quercus sideroxylla* comenzó a repoblarse. En el área bajo estudio se ha reportado que al aumentar la altitud, el índice de diversidad aumenta (Zacarías y del Castillo, 2010).

Cuadro 2.3. Comparación de los índices de diversidad por forma de vida para bosques con manejo y sin manejo en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

Tratamiento Silvícola	Forma de vida	SHANNON			ALFA DE
		WIENER	SIMPSON	MARGALEF	FISHER
BM	Árboles	1.44 ^a	3.39 ^a	1.27 ^a	1.59 ^{ab}
	Arbustos	1.52 ^a	4.17 ^{ab}	1.11 ^{ab}	1.42 ^a
	Herbáceas	2.37 ^c	12.08 ^c	3.63 ^c	8.99 ^c
BNM	Árboles	1.58 ^a	4.34 ^{ab}	1.66 ^{abc}	2.61 ^{bc}
	Arbustos	1.54 ^a	4.47 ^{ab}	1.67 ^{bc}	2.94 ^{bc}
	Herbáceas	1.61 ^a	15.96 ^{bc}	2.15 ^{bc}	14.14 ^c

BNM= Bosque sin Manejo, BM=Bosque con manejo (Medias seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$ suma de rangos de Wilcoxon))

Con relación a las formas de vida se encontró que independientemente de los índices utilizados existen diferencias significativas en las formas de vida entre el bosque con y sin manejo. La prueba de comparación de medias a través de la suma de rangos de Wilcoxon encontró en general la mayor diversidad de especies tanto herbáceas como arbustivas.

El Cuadro 2.34 presenta los valores de índices de diversidad (índice de Shannon, índice de Simpson, índice de Margalef y alfa de Fisher) por formas de vida. En general, la mayor diversidad arbórea se presentó en las áreas sin manejo y en los tratamientos silvícolas de árboles padre y de selección 1998, mientras que la menor diversidad de especies de arbustos y herbáceas se presentó en el tratamiento árboles padre 2011 y aclareo ligero 2011.

Diversos estudios han reportado la modificación de la diversidad y composición del estrato arbóreo como resultado del aprovechamiento forestal (Leyva *et al.*, 2010 Hernández *et al.*, 2013). Sin embargo, en otros estudios en cortas de selección en franjas y en árboles padre, no se reportan diferencias entre tratamientos en relación a la diversidad de especies para el estrato arbóreo (Santiago, 2006). En el área bajo estudio, se ha reportado que las especies arbustivas presentan mayor variación que los árboles en riqueza de especies, en donde la diversidad de esta forma de vida, disminuye de acuerdo a la altitud (Zacarias y del Castillo 2010).

Las especies herbáceas y arbustivas aumentaron a medida que la apertura de claros es mayor, ya que estos generan condiciones óptimas para el desarrollo de nuevas especies. Corral *et al.*, 2005 encontraron que la diversidad arbórea disminuyó al realizar aprovechamiento forestal en el bosque mesófilo de montaña en El Cielo Tamaulipas; por otro lado, Graciano (2001) menciona que las cortas selectivas disminuyen la diversidad arbórea al realizar el aprovechamiento forestal; así también Canizales *et al.*, 2009 menciona que las formas de vida cambian con respecto al clima, a la altitud y al tipo de ecosistema que se esté evaluando.

Las especies herbáceas y las arbustivas fueron las formas de vida con índice de diversidad, en general, mayores a los árboles en los tratamientos silvícolas analizados. Lo anterior pudiera explicarse debido a que las condiciones de microclima que se generan al utilizar tratamientos silvícolas, cambian drásticamente. Ya que en condiciones del dosel cerrado, se limita la cantidad de luz que pasa por el sotobosque, por lo que la apertura del dosel modifica el microhábitat la densidad y composición de arbustos y herbáceas, que generalmente son más sensibles a variaciones microclimáticas (Decoq, 2002).

Así mismo, los arbustos, por su menor talla, son probablemente menos demandantes de humedad que los árboles y, tienden a dominar. Estos resultados coinciden con lo encontrado en regiones montañosas tropicales (Vázquez y Givnish, 1998) y templadas secas (Encina *et al.*, 2007).

Cuadro 2.4. Comparación de los índices de diversidad por forma de vida para los estratos en cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

TRATAMIENTO SILVICOLA	FORMA DE VIDA	SHANNON			
		WIENER	SIMPSON	MARGALEF	FISHER
BNM	Árboles	1.58 ^{abcd}	4.34 ^{abcd}	1.66 ^{abcd}	2.30 ^{bcde}
	Arbustos	1.54 ^{abc}	4.47 ^{abcde}	1.67 ^{bcd}	2.93 ^{bcde}
	Herbáceas	1.61 ^{abcd}	15.96 ^{cde}	2.15 ^{cd}	4.63 ^{de}
AP 1998	Árboles	1.67 ^{abcde}	4.56 ^{abcde}	1.25 ^{abc}	1.54 ^{abc}
	Arbustos	1.28 ^a	3.34 ^{ab}	0.91 ^a	1.24 ^a
	Herbáceas	2.41 ^{de}	15.27 ^e	3.85 ^d	10.79 ^e
	Árboles	1.36 ^a	2.86 ^{ab}	1.09 ^{abc}	1.50 ^{ab}

AP 2011	Arbustos	1.51 ^{ab}	4.02 ^{abc}	1.05 ^{ab}	1.45 ^{ab}
	Herbáceas	2.32 ^{bcde}	10.07 ^{cde}	3.20 ^d	6.06 ^{cde}
CS 1998	Árboles	1.61 ^{abcde}	4.07 ^{abc}	1.39 ^{abcd}	1.88 ^{abcd}
	Arbustos	1.7 ^{abcdef}	5.12 ^{bcde}	1.33 ^{abcd}	1.72 ^{abcde}
	Herbáceas	2.28 ^{cde}	11.66 ^{de}	3.53 ^d	8.54 ^{de}
AL 2011	Árboles	1.12 ^a	2.08 ^a	1.36 ^{abcd}	1.67 ^{abcd}
	Arbustos	1.58 ^{abcde}	4.42 ^{abcde}	1.14 ^a	1.42 ^{ab}
	Herbáceas	2.46 ^e	11.33 ^{de}	3.93 ^d	8.55 ^{de}

BNM= Bosque sin Manejado, AP=Árboles Padre, AL=Aclareo Ligero, CS= Cortas de Selección, Medias seguidas por letras diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$ suma de rangos de Wilcoxon).

Diversidad beta.

En el Cuadro 2.45 se presentan valores de índices de semejanza florística (Jaccard y Sorensen) para cada uno de los tratamientos silvícolas y los bosques sin manejo.

Cuadro 2.5. Índice de semejanza florística para cada uno de los tratamientos silvícolas y el bosque no manejado en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

	CS 1998	AP 1998	AL 2011	AP 2011	BNM	
CS 1998	43	0.821	0.725	0.641	0.353	CS 1998
AP 1998	0.901	42	0.556	0.667	0.458	AP 1998
AL 2011	0.841	0.714	36	0.615	0.581	AL 2011
AP 2011	0.781	0.800	0.762	42	0.465	AP 2011
BNM	0.522	0.22	0.735	0.635	30	BNM

BNM= Bosque sin manejo, AP=Árboles Padre, AL=Aclareo Ligero, CS= Cortas de Selección; valores por arriba de la diagonal indican el índice de Jaccard, por debajo de ésta al índice de Sorensen, y valores de la diagonal representan la riqueza.

El tratamiento de árboles padre 1998 y el de cortas de selección 1998 presentaron los valores más altos para los índices de diversidad beta; lo cual indica una alta similitud en la composición de especies. Por otro lado, el aclareo ligero 2011 y árboles padre 2011, también presentan altos valores de diversidad beta. El bosque sin manejo, al compararse con los demás tratamientos, fue el que obtuvo los índices más bajos.

Los valores cambian sin presentar un patrón definido por la intensidad, tipo de tratamiento silvícola o tiempo de aplicación. Sin embargo, Peña (2003) menciona que la diversidad de especies aumenta conforme avanza la edad del rodal, en este caso árboles padre 1998 y cortas de selección 1998 compartieron el mayor número de especies, posiblemente porque las condiciones que se generaron después de 13 años son similares. En lo anterior, puede jugar un papel importante la apertura de claros derivados de la intensidad de corta. Asimismo, se encontró que en un bosque templado del noreste de México la diversidad disminuye, pero la riqueza específica del bosque se mantiene conforme la masa forestal se desarrolla (Hernández *et al.*, 2013). Lo anterior pudiera explicarse al hecho de que las intervenciones silvícolas de manera selectiva se dirigen a la reducción de especies de menor valor comercial y a favorecer al género *Pinus* (Solís *et al.*, 2006).

En un bosque mesófilo de montaña en Tamaulipas se encontró que las especies arbóreas se comparten en más de un 80% (Corral *et al.*, 2005). En un ecosistema similar en Jalisco, se encontró que el porcentaje de semejanza florística fue del 58.7 % (Sánchez *et al.*, 2003). En Ixtlán en un bosque similar al área bajo estudio se reporta que en un tratamiento de selección en fajas, la diversidad beta fue mayor en las fajas manejadas y en el borde de las mismas (Vázquez, 2013). Los principales factores que influyen en las diferencias entre hábitats son la riqueza de especies, la escala espacial, el cambio en las condiciones del ambiente y la ocupación de las especies (Koleff, 2005; Vázquez, 1993).

2.8 CONCLUSIONES

La estructura tanto para las distribuciones diamétricas como distribuciones de altura se asemejan a una distribución normal con asimetría positiva para todos los tratamientos silvícolas; para el bosque sin manejo, la distribución de diámetros y alturas presentó una doble distribución normal de campana donde se puede concluir que se debe a la mezcla de especies en el bosque y a los diferentes diámetros y alturas que se presentan.

Las especies con mayor índice de valor de importancia fueron el *Pinus oaxacana*, *Quercus magnifolia* y *Quercus rugosa* para todos los tratamientos silvícolas. Para los bosques sin manejo, *P. oaxacana* y *Persea longipes* presentaron el mayor IVI, esta última especie, también presente el tratamiento silvícola de árboles padre 1998.

En relación a las formas de vida, la mayor dominancia fue de los árboles presentes en mayor número de individuos por hectárea. Los arbustos y herbáceas constituyeron un mayor número de individuos en los tratamientos de aclareo ligero 2011 y árboles padre 2011, y el menor en los bosques sin manejo, en comparación con los demás tratamientos silvícolas.

En el área muestreada se registraron 43 especies que pertenecen a 31 géneros y 25 familias; las familias más frecuentes fueron la Asteraceae, la Fabaceae y la Fagaceae para los bosques con y sin manejo. La familia Pinaceae tuvo un mayor número de individuos en las dos condiciones.

En relación a los tratamientos silvícolas, se encontró que las especies presentes en los tratamientos evaluados cambiaron con relación al tratamiento aplicado y su intensidad de manejo; en donde por ser un bosque de pino- encino, dominaron las familias Pinaceae y Fagaceae. La familia Asteraceae tiene una gran cantidad de especies ya que es común que después de un disturbio, las especies que colonizan a los sitios corresponden a esta familia.

Para los bosques sin manejo se encontró que las familias que dominaron fueron las Pinaceae y la Fagaceae, pero en comparación a los demás tratamientos silvícolas, el número de individuos fue menor. La especie *Litsea glauscescens* Kunth estuvo presente en el bosque sin manejo y en el tratamiento de árboles padre 1998. En este último, se pudo observar que las especies presentes antes del manejo se comienzan a recuperar con el paso del tiempo.

Los índices de diversidad alfa (Shannon-Wiener, inverso de Simpson, Margalef y alfa de Fisher) presentaron valores con una mayor diversidad de especies en los

bosques sin manejo en comparación con los bosques manejados. En relación a las formas de vida, se encontró que hay una mayor diversidad de especies herbáceas y arbustivas en los tratamientos silvícolas de árboles padre y aclareo ligero 2011 de acuerdo a la prueba de Kruskal-Wallis y la suma de rangos de Wilcoxon.

Con relación a la diversidad beta, el tratamiento de árboles padre 1998 presentó un índice de Sorensen del 90% en comparación con el índice de Jaccard que fue del 66%. El aclareo ligero 2011 presentó una diversidad con un porcentaje del 84%, así mismo, en la corta bajo árboles padre 2011 se presentó un índice alto (80%), mientras que el bosque sin manejo presentó los porcentajes más bajos para los dos índices de semejanza.

CAPÍTULO 3 EFECTOS DEL MANEJO FORESTAL SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN SANTA CATARINA IXTEPEJI, OAXACA.

3.1 RESUMEN

Las operaciones de remoción de arbolado pueden ocasionar daños físicos al suelo y disminuir la productividad forestal. Este estudio tuvo como finalidad evaluar cambios en densidad aparente (D_a), la resistencia mecánica (RM) y la humedad del suelo por efecto del manejo forestal, en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. Se evaluaron estas características en cuatro áreas bajo tratamiento silvícola (cortas de selección 1998, aclareo ligero 2011 y árboles padre 1998 y 2011), así como áreas sin manejo forestal. Los resultados indican que la densidad aparente fue mayor en los tratamientos de árboles padre 2011 y aclareo ligero 2011. En el bosque sin manejo y en áreas de árboles padre 1998, no mostraron diferencias significativas, sugiriendo que después de 15 años de intervención el suelo regresó a los valores de D_a previos al disturbio. Los tratamientos con menor RM fueron el bosque sin manejo y árboles padre 1998, con valores de 1.5 a 2.5 Mpa; mientras que en el resto de los tratamientos los valores fueron de 2 a 4 Mpa. La humedad volumétrica del suelo disminuyó con el incremento en D_a , lo que en parte se explicó por la influencia de la materia orgánica del suelo. Los resultados indican que los tratamientos silvícolas aplicados en el área hasta el momento no han afectado de forma irreversible la condición física del suelo; sin embargo, se requiere dar oportunidad a la recuperación física del suelo después de cada intervención silvícola.

Palabras clave: tratamientos silvícolas, impactos temporales, resistencia mecánica, humedad del suelo, densidad aparente

3.2 ABSTRACT

Harvest operations may cause some damage to the soil physical properties and as a result forest productivity can be lower. This study was realized to know how silvicultural practices can affect the soil bulk density (Da), mechanical strength (RM), and soil moisture in a forest of Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca State. These physical characteristics were evaluated in four stands under silvicultural treatments (1998 selection cutting, 2011 light thinning, and 1998 and 2011 seed trees) and some areas without silvicultural treatment. The results showed that soil bulk density was higher in 2011 seed tree and 2011 light thinning stands, while stands without treatment and 1988 seed trees did not show significant differences. This suggests that after 15 years of silvicultural treatments soil bulk density returns to the original values previous to the disturbance. The lower RM values were in areas without management (1.5 MPa) and 1998 seed tree treatments (2.5 MPa). Most soil RM values ranged from 2 to 4 MPa. The volumetric soil moisture decreased as increasing Da, which is partly explained by the influence of soil organic matter. The results indicate that silvicultural treatments in the study area have been not affected in an irreversibly way these soil physical conditions.

Keywords: silviculture, temporary impacts, mechanical strength, soil moisture, bulk density

3.3 INTRODUCCIÓN

En los ecosistemas forestales los daños físicos al suelo ocurren principalmente durante la extracción de arbolado. Otras actividades que podrían afectar la condición física del suelo son: la preparación del terreno, el pastoreo, la apertura de caminos, los patios de concentración, y el paso de maquinaria, ganado y gente. La disminución en las coberturas arbórea y herbácea y del piso forestal conllevan a mayores riesgos de erosión laminar y en surcos (Patterson *et al.*, 1980, Grigal, 2000 y Moffat, 2003).

Las actividades de manejo forestal pueden afectar la calidad de los suelos con impactos que varían de acuerdo a la intensidad de manejo de los ecosistemas (Grigal, 2000). Esto significa que los cambios en las propiedades físicas del suelo y su funcionamiento, resultan inevitables durante el aprovechamiento, sin embargo, no todas las acciones se manifiestan en una degradación irreversible (Moffat., 2003), ya que el suelo tiene una capacidad de recuperación.

A partir de una revisión y análisis de las evidencias sobre la pérdida de productividad del suelo por efecto del aprovechamiento forestal (Morris y Miller 1994, Powers *et al.*, 1990), encontraron que la densidad aparente y la reducción del contenido de materia orgánica, son los dos factores que podrían alterar la calidad edáfica, cambiando el entorno donde crecen las raíces para soportar la biomasa aérea y generar productividad primaria.

Cuando se busca mantener la calidad del suelo, el desafío es, el desarrollo de estrategias de manejo que es complicado debido a que no todos los sitios son similares y cada uno de ellos cuenta con características específicas que los hacen únicos (Fox, 2000). Por lo anterior es importante comprender cuales son los procesos y propiedades que afectan y potencialmente limitan la productividad. Del mismo modo, es importante identificar la sensibilidad o el grado de susceptibilidad a la degradación de cada suelo ya que la magnitud del impacto de una práctica difiere en cada uno de ellos.

A pesar de que se tiene claridad del papel central que cumple el mantenimiento de la capacidad productiva del suelo sobre la sustentabilidad de los ecosistemas forestales, aún no se ha llegado a un consenso de qué propiedades específicas del suelo se deben evaluar como indicadores de la sustentabilidad forestal (Burger y Kelting 1999; Page-Dumroese *et al.*, 2000; Staddon *et al.*, 1999).

La literatura que trata del efecto que tienen las prácticas silvícolas sobre las propiedades del suelo es abundante a nivel internacional; sin embargo, en México no, por lo que es importante conocer los cambios en la estructura de los suelos y las propiedades físicas en estas condiciones.

El manejo forestal impacta algunas características del suelo como son la densidad aparente, la tasa de infiltración y la resistencia mecánica, y éstas presentan variaciones de acuerdo a la intensidad del manejo y al tipo de tratamiento silvícola. Por lo anterior esta investigación está enfocada a estudiar los cambios en las propiedades físicas del suelo (resistencia mecánica, densidad aparente y humedad del suelo) con relación a los diferentes tratamientos silvícolas, teniendo como punto de comparación un bosque sin manejo. La hipótesis es que los cambios en densidad aparente, resistencia mecánica y humedad del suelo superficial (10 cm) son diferentes entre tratamientos silvícolas y fechas de aplicación.

3.4 OBJETIVOS

3.4.1 Objetivo general

Evaluar el cambio en algunas propiedades físicas del suelo en rodales con y sin manejo forestal.

3.4.2 Objetivos específicos

Comparar los cambios en la densidad aparente entre los diferentes tratamientos silvícolas.

Evaluar los cambios en la resistencia mecánica después de realizar manejo forestal con diferentes tratamientos silvícolas.

Comparar los cambios en la humedad del suelo como resultado de la aplicación de diferentes sistemas silvícolas.

3.5 REVISIÓN DE LITERATURA

3.5.1 Suelo

El suelo es un subsistema fundamental del ecosistema forestal, con características físicas, químicas y biológicas (Fassbender, 1966). Las principales características físicas edáficas que influyen sobre el desarrollo de la vegetación son: la profundidad del suelo, la capacidad de retención de humedad, la estructura, la textura y la resistencia mecánica.

El suelo se forma por intemperismo físico y químico influenciado por la actividad biológica de la vegetación y microorganismos (López *et al.*, 2006). Por lo anterior, bajo cada régimen de clima se forma un suelo distinto (Núñez, 2000).

El material mineral está constituido por los componentes inorgánicos del suelo, mientras que la materia orgánica corresponde a los residuos de origen predominantemente vegetal que se acumula en el suelo (Núñez, 2000). López *et al.*, (2006) mencionan que a través del tiempo los residuos de las plantas devuelven al suelo más de lo que reciben de él ya que al morir, se incorporan a éste y el sustrato se enriquece con la materia orgánica que permite la colonización de organismos que transforman los residuos vegetales y animales en humus. Centeno y Ruiz (1993) mencionan que el mantillo o piso forestal (horizonte O) influye de forma negativa sobre la regeneración natural cuando la velocidad de descomposición es menor que la de incorporación, dado que a mayor espesor es menos probable que la semilla haga contacto con el suelo mineral evitando el establecimiento de las plantas.

3.5.2 Disturbios en el suelo

En los ecosistemas forestales los disturbios ocasionados en el suelo ocurren con mayor frecuencia en la etapa del aprovechamiento forestal, generando procesos de erosión laminar y en surcos (Morris y Miller 1994; Powers *et al.*, 1990). Se ha encontrado que las propiedades físicas y el contenido de materia orgánica son los dos factores que podrían alterar la calidad edáfica, cambiando el entorno donde crecen las raíces para soportar la biomasa aérea y generar productividad primaria (Powers *et al.*, 1998)

El cambio en las propiedades físicas del suelo después de un disturbio está en función del grado de afectación, la duración de los efectos y la extensión del disturbio que afecta la funcionalidad hidrológica, su calidad y productividad (Froehlich, 1976; Snider y Miller, 1985; Clayton *et al.*, 1987; Craigg y Howes, 2007)

El grado y duración de los efectos del disturbio dependen de las propiedades físicas del suelo como la textura, de la presencia de fragmentos gruesos o del contenido de materia orgánica, el clima y actividad biológica. La extensión, distribución y, en algunos casos, el grado de disturbio en las áreas bajo manejo, pueden ser controlados siguiendo algunas recomendaciones como por ejemplo, el cambio de la época de cosecha a temporadas secas, y la modificación de la densidad y distribución de los caminos, reducción del número de pasos de maquinaria, derribo direccional y utilización de acolchados con residuos de cosecha (Craigg y Howes 2007).

3.5.3 Resistencia mecánica

La resistencia mecánica es una propiedad física del suelo que proporciona indirectamente información sobre el esfuerzo que debe realizar la raíz para deformar el suelo y crecer en su interior (Gómez *et al.*, 2002). La utilidad de esta variable, por ejemplo, se considera al tomar decisiones sobre las labores de preparación del suelo, previo al establecimiento de las plantas en las obras de reforestación o para mejorar las prácticas de extracción (Krüger *et al.*, 2009). El

crecimiento de la raíz varía con la textura del suelo y aunque haya una relación general de la densidad aparente y la textura, no todos los valores de densidad altos corresponden a una resistencia mecánica alta. Por ejemplo, en suelos arenosos la densidad aparente es alta, pero no necesariamente lo es su resistencia mecánica (Tirado, 2005).

Varios estudios han demostrado que la compactación del suelo ocurre principalmente en los primeros 40 cm de profundidad, cuando se presentan actividades de manejo y es el espacio donde se presenta el mayor número de raíces que tiene como función principal la absorción de agua y nutrientes (Gómez *et al.*, 2002). Cuando el suelo se compacta, se reducen los macroporos y estos se consideran importantes ya que permiten el movimiento rápido de agua y del aire, sin estos factores limitantes, se pueden presentar condiciones anaeróbicas en la etapa de crecimiento de las plantas, reduciendo el oxígeno disponible y en consecuencia, afectando el crecimiento de las plantas (Tirado, 2005).

La resistencia mecánica que afecta el crecimiento de las raíces también puede deberse a la presencia de rocas o a horizontes muy pedregosos, a poca profundidad, como a la presencia de capas de suelo endurecidas o compactadas en las cuales la densidad es alta y existen pocos espacios entre las partículas (Vázquez *et al.*, 2010).

Es importante tener en cuenta que, aunque las raíces son capaces de penetrar por grietas y poros muy pequeños, las paredes de estos deben ser capaces de ceder ante la presión ejercida por la raíz. No obstante, conforme aumenta la densidad del suelo, el crecimiento de la raíz requiere de un mayor gasto de energía, por lo que es necesaria poder detectarla y controlarla (Torres *et al.*, 2008).

3.5.4 Densidad aparente

La densidad aparente es una propiedad del suelo que se refiere a la relación entre la masa de suelo seco por unidad de volumen (Cabalceta, 2009). Esta propiedad

se utiliza para estimar el espacio poroso, para transformar la humedad gravimétrica a volumétrica o la lámina, o para la estimación de reservorios de nutrientes por unidad de volumen del suelo. También se utiliza como un parámetro de clasificación de los suelos orgánicos y derivados de cenizas volcánicas. Una densidad baja, generalmente equivale a un suelo con alto nivel de materia orgánica y buen desarrollo estructural, en este sentido, un suelo de un bosque saludable tendrá una densidad baja, menor a 1 Mg m^{-3} en el suelo superficial (Lampurlanés *et al.*, 2003).

La densidad aparente afecta indirectamente el crecimiento de las plantas, ya que su aumento restringe la penetración de las raíces, reduce la aireación y la tasa de infiltración (Campbell, 1994; Fisher y Binkley, 2000; Passioura, 2002; Tang y Chang, 2007). Ésta se puede incrementar por el paso excesivo de ganado y maquinaria de cosecha, y los efectos más notables son particularmente en suelos de textura media (Fisher y Binkley, 2000; Gómez *et al.*, 2002), constituyéndose en el principal indicador de compactación. De acuerdo con Reichert *et al.* (2009), la densidad aparente óptima y su límite crítico para la plantas, depende del tipo de suelo, de la textura, de la mineralogía, de la MO, de la estructura, del agua y del aire; la limitación de estos factores influye en raíces de las plantas disminuyendo la productividad del ecosistema.

3.5.5 Humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo es la relación entre la masa de agua y la masa de las partículas, esto se puede expresar en términos de porcentaje con respecto a la masa o volumen del suelo, o bien como lámina si se considera la profundidad del suelo (Bacchi y Reichardt 2003).

Para conocer las condiciones del suelo después del aprovechamiento, se emplean dos parámetros importantes, la densidad aparente y la resistencia mecánica a un determinado contenido de humedad.

El incremento en la densidad aparente por un lado causa un aumento de la resistencia mecánica y por otro, reduce la porosidad y la tasa de infiltración, así como el abastecimiento de oxígeno utilizado por las raíces (Ramírez y Jiménez 2009).

Por otra parte, el contenido de agua es un factor asociado a la resistencia mecánica de los suelos. Los suelos presentan mayor resistencia en la medida que se secan y menor resistencia cuando están más húmedos.

3.5.6 La densidad aparente y el desarrollo de las plantas

La densidad aparente puede ser incluida dentro de un grupo de parámetros cuya medición es necesaria para evaluar la calidad de un suelo y emplearla como indicador de la estructura, de la resistencia mecánica el enraizamiento y de la cohesión del mismo (Vásquez *et al.*, 2010; Doran y Parkin, 1994). Los cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación que existe entre densidad aparente y la porosidad total.

Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y baja resistencia, lo que permite un buen desarrollo de las raíces. El suelo superficial y particularmente el horizonte A tiene estas características. Los valores altos de la densidad aparente son propios de suelos compactados, con aireación deficiente e infiltración lenta de agua, lo cual puede provocar anoxia y crecimiento deficiente o muerte de las raíces (Donoso, 1992). Por otra parte, la densidad aparente de un suelo determina el número y diversidad de especies forestales y los organismos del suelo (Alameda, 2010).

3.6 MATERIALES Y MÉTODOS

3.6.1 Área de estudio

Para el muestreo de las propiedades físicas del suelo, el área de estudio fue la misma que se utilizó para evaluar composición y diversidad, indicada en el Capítulo 2; ésta se localiza en áreas con manejo forestal donde se están realizando los tratamientos de árboles padre, aclareos ligeros y cortas de selección, así mismo se evaluaron las áreas sin manejo del bosque de pino-encino. Las áreas muestreadas corresponden a las anualidades (1998- 1999) y (2010-2011); para cada uno de los tratamientos se evaluó un área representativa de todo el tratamiento, equivalente a una hectárea de superficie.

3.6.2 Diseño de muestreo

Para seleccionar las áreas de muestreo se utilizaron los mapas de los tratamientos silvícolas y los programas de manejo que corresponden a los ciclos de corta (1998-2008) y (2008-2018). Se buscaron áreas con tratamientos silvícolas aplicados en los periodos 1998-1999 y 2010-2011, correspondientes al primer y segundo ciclo de corta del programa de manejo de Santa Catarina Ixtepeji y el área sin manejo.

3.6.3 Toma de datos en campo y

Para el levantamiento de datos campo se seleccionó un rodal para cada uno de los tratamientos silvícolas, los cuales presentan características similares entre ellos y con el bosque sin manejo en relación a la vegetación, a la altitud y a la pendiente, con dominancia de *Pinus oaxacana*; en cada rodal se delimitó un sitio de una hectárea de superficie en donde se midieron las diferentes propiedades del suelo.

Selección de áreas de muestreo

Para el levantamiento de datos campo se seleccionó un rodal para cada uno de los tratamientos silvícolas, éstos tenían características similares entre ellas y con el bosque sin manejo en relación a la vegetación, a la altitud y a la pendiente, con dominancia de *Pinus oaxacana*; en éstas se delimitó un sitio equivalente a una hectárea en superficie donde se midieron las diferentes propiedades del suelo.

Distribución de puntos de muestreo

Los puntos de muestreo se distribuyeron en forma sistemática en la superficie de 1 ha en cada uno de los sitios correspondientes a cada uno de los tratamientos (Figura 3.1). Estos fueron delimitados con la ayuda de una brújula para orientar el rumbo; el sitio fue dividido cada diez metros en total se trazaron 100 puntos dentro de la hectárea cada 10 metros que fueron señaladas con una estaca para posteriormente realizar las mediciones de las propiedades físicas del suelo.

10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
9	19	29	39	49	59	69	79	89	99
8	18	28	38	48	58	68	78	88	98
7	17	27	37	47	57	67	77	87	97
6	16	26	36	46	56	66	76	86	96
5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
4	14	24	34	44	54	64	74	84	94
3	13	23	33	43	53	63	73	83	93
2	12	22	32	42	52	62	72	82	92
1	11	21	31	41	51	61	71	81	91

Figura 3.1 Distribución de los puntos de muestreo para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

3.6.4 Medición de variables

Resistencia mecánica

Para la medición de la resistencia mecánica se utilizó un penetrómetro de impacto calibrado para suelos forestales por investigadores del Colegio de Postgraduados (Vázquez *et al.*, 2010) (Patente en trámite). Y se midió en cada uno de los puntos marcados con las estacas dentro de la ha en los tratamientos silvícolas en el bosque con manejo y en las áreas sin manejo. En cada punto se realizó una serie de 10 impactos y se registró la acumulación de los impactos en centímetros para posteriormente calcular la resistencia mecánica.

Humedad del suelo

La humedad volumétrica del suelo se determinó durante los meses de mayo a junio de 2013, registrándose la lectura obtenida a través de un equipo TDR (Time Domain Reflectometry).

Densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente las muestras fueron distribuidas sistemáticamente a cada 20 metros de distancia una de otra, dando un total de 20 muestras en cada sitio de 1 hectárea en los rodales con y sin manejo. Las muestras se colectaron a 10 cm de profundidad con un muestreador que consta de un martillo deslizable en donde se adaptan anillos de dos pulgadas de diámetros y alturas variables de 2 a 6 pulgadas; la muestra recolectada se corta a nivel de las dos dimensiones del cilindro y se colocaron en bolsas de plástico para evitar pérdidas de humedad, se etiquetaron y se llevaron a laboratorio para su análisis posterior.

3.6.5 Análisis de laboratorio

Densidad aparente

La densidad aparente se calculó después de obtener la masa de suelo seco de las muestras inalteradas tomada en campo. Después de haber sido secadas en una estufa durante 24 horas de secado a 105°C y las muestras alcanzaron un peso constante. La densidad aparente se estimó como se indica a continuación:

$$Db = \frac{\text{masa del suelo seco en gramos}}{\text{volumen total del suelo en cm}^3}$$

Donde Db = densidad aparente en Mg m^{-3}

Resistencia mecánica

Para el cálculo de la resistencia se utilizó un penetrómetro cónico de impacto diseñado en el Colegio de Postgraduados (Vásquez, *et al.*, 2010) el cual cuenta con un martillo de 724.9 g de caída libre. El impacto ocasiona que la punta del penetrómetro cónico penetre en el suelo venciendo su resistencia. La energía aplicada depende del número de impactos.

El indicador de resistencia se estima a partir de la energía aplicada y la profundidad de avance. La fórmula que se utilizó para evaluar la resistencia mecánica es la siguiente y también se consideró el peso del eje y martillo, la gravedad 9.8 m/s^2 y la altura a la que se dejó caer el martillo 1 m.

$$Rs = \frac{Ws}{Pd}$$

Donde:

Rs = Resistencia mecánica del suelo

Ws = Trabajo hecho por el suelo

Pd = Distancia que recorre el penetrómetro a través del suelo

$$Kf = Ws = \frac{1}{2}mv^2$$

Donde:

Kf = Energía cinética

Ws = Trabajo hecho por el suelo

m = Masa

V= velocidad final

$$V = \sqrt{Vo^2 + 2a(x)}$$

Donde:

Vo = Velocidad inicial = 0

a = Gravedad

x = Altura fija

Así también, se calculó la resistencia mecánica en Pascales, en donde se consideró la energía que el suelo opone para que el penetrómetro se desplace en sus primeras capas, con la siguiente formula:

$$R = \frac{mgH m}{A \Delta z m + m'}$$

Donde:

R = Resistencia mecánica

A = Área basal del cono m^2

g = gravedad m/s^2

m = masa del martillo (kg)

m' = masa del eje (kg)

ΔZ = profundidad de la penetración (m)

H = altura de caída libre del martillo

3.6.6 Análisis de datos

Una vez obtenida la información de resistencia mecánica de cada uno de los sitios con diferente tratamiento silvícola, se elaboraron mapas bi y tridimensionales de la variable resistencia mecánica con el software SURFER versión 11.0 Análisis de varianza de las propiedades físicas del suelo.

El análisis se realizó para las propiedades físicas del suelo (densidad aparente, resistencia mecánica y humedad del suelo) y los tratamientos silvícolas evaluados, una vez obtenidos los datos de campo y laboratorio de las propiedades físicas del suelo se realizó un análisis de varianza a través del paquete estadístico InfoStat versión 2010, para determinar las diferencias significativas entre los tratamientos silvícolas evaluados.

Comparación de medias entre propiedades físicas del suelo

También se realizaron comparación de medias para los valores de cada una de las propiedades físicas del suelo evaluadas entre los tratamientos silvícolas evaluados mediante la prueba Tukey ($\alpha \leq 0.05$) través del paquete estadístico InfoStat versión 2010 (Di Rienzo *et al.*, 2010).

3.7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.7.1 Densidad aparente

El análisis de varianza para la densidad aparente entre los tratamientos silvícolas evaluados mostró que existen diferencias altamente significativas entre los tratamientos silvícolas (Cuadro 3.1).

La densidad aparente en rodales sin manejo no fue significativamente diferente ($p \leq 0.05$) a la del tratamiento de Árboles Padre 1998 (AP1988), pero sí hubo diferencias estadísticas con respecto a los demás tratamientos. El bosque sin manejo y AP1998 tuvieron una menor densidad aparente; y forman un grupo que fue diferente a los demás tratamientos silvícolas ($P < 0.05$) (Figura 3.2).

Con relación a la densidad aparente encontrada en cada uno de los tratamientos silvícolas, los cambios se pudieran explicar que con el paso de los años después de haber realizado los tratamientos silvícolas, ésta disminuye (Figura 3.2), debido a los cambios en la estructura y a la intensidad de cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados. Vázquez *et al.*, (2010) encontraron que en bosques de encinos la densidad aparente osciló entre 1.0 y 1.2 Mg m⁻³. Por otro lado en un sistema agroforestal con suelos con textura franco arcillosa a arcillosa, se encontró que la Da al momento de establecer el sistema fue de 1.43 Mg m⁻³ y después de 6 años ésta aumento a 1.6 Mg m⁻³ (Murray *et al.*, 2011).

La densidad aparente (Da) es dependiente de la porosidad y de la textura del suelo, es por esto que ésta adquiere valores muy variables aun en un mismo tipo de suelo, y es afectada por las actividades de manejo y la cantidad de materia orgánica presente en el suelo (Brady y Weil, 1999; Warrick, 2002). Una alta densidad aparente afecta a la planta porque inhibe la penetración de las raíces y su desarrollo. En suelos de textura fina, valores de 1.4 Mg m⁻³ en la Da puede restringir el crecimiento de la raíz, pero en suelos de textura gruesa, este efecto se presenta cuando la Da alcanza un valor de 1.6. Mg m⁻³ (León, 2003).

Cuadro 3.1. Suma de cuadrados y cuadrados medios del análisis de varianza para la densidad aparente de tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji.

FV	SC	Gl	CM	F	Pr>F
Modelo	1.68	4	0.42	9.14	<0.0001
Tratamiento silvícola	1.68	4	0.42	9.14	<0.0001
Error	4.36	95	0.05		
Total	6.04	99			

F.V.= Fuente de Variación, SC= Suma de Cuadrados, Gl= grados de libertad, CM= Cuadrados Medios, F= F calculada, Pr>F= Significancia.

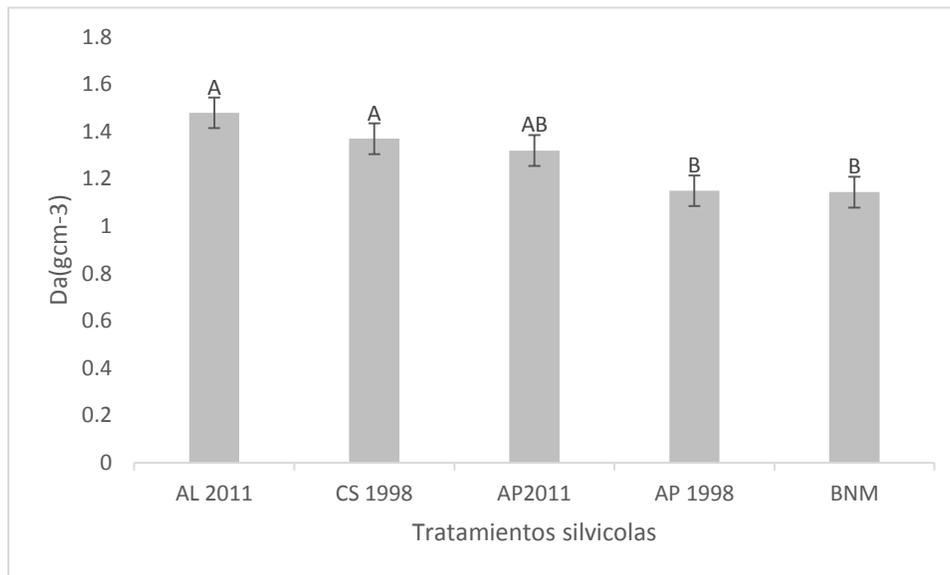


Figura 3.2. Comparación de los valores medios y error estándar de la densidad aparente para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji, BNM= Bosque sin Manejado, AP=Árboles Padre, AL=Aclareo Ligero, CS= Cortas de Selección Letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$)

3.7.2 Resistencia mecánica

La Figura 3.3 muestra que la resistencia mecánica presentó variaciones entre los tratamientos silvícolas evaluados El tratamiento de árboles padre 1998 y el bosque sin manejo fueron los que presentaron una menor resistencia mecánica en un

promedio de 1.5 a 2.5 MPa; a diferencia del tratamiento árboles padre 2011, aclareo ligero 2011 y cortas de selección 1998 en donde se encontró una mayor resistencia mecánica. La mayoría de los valores obtenidos, se ubicaron dentro de un intervalo de 2 a 4 MPa (Figura 3.3).

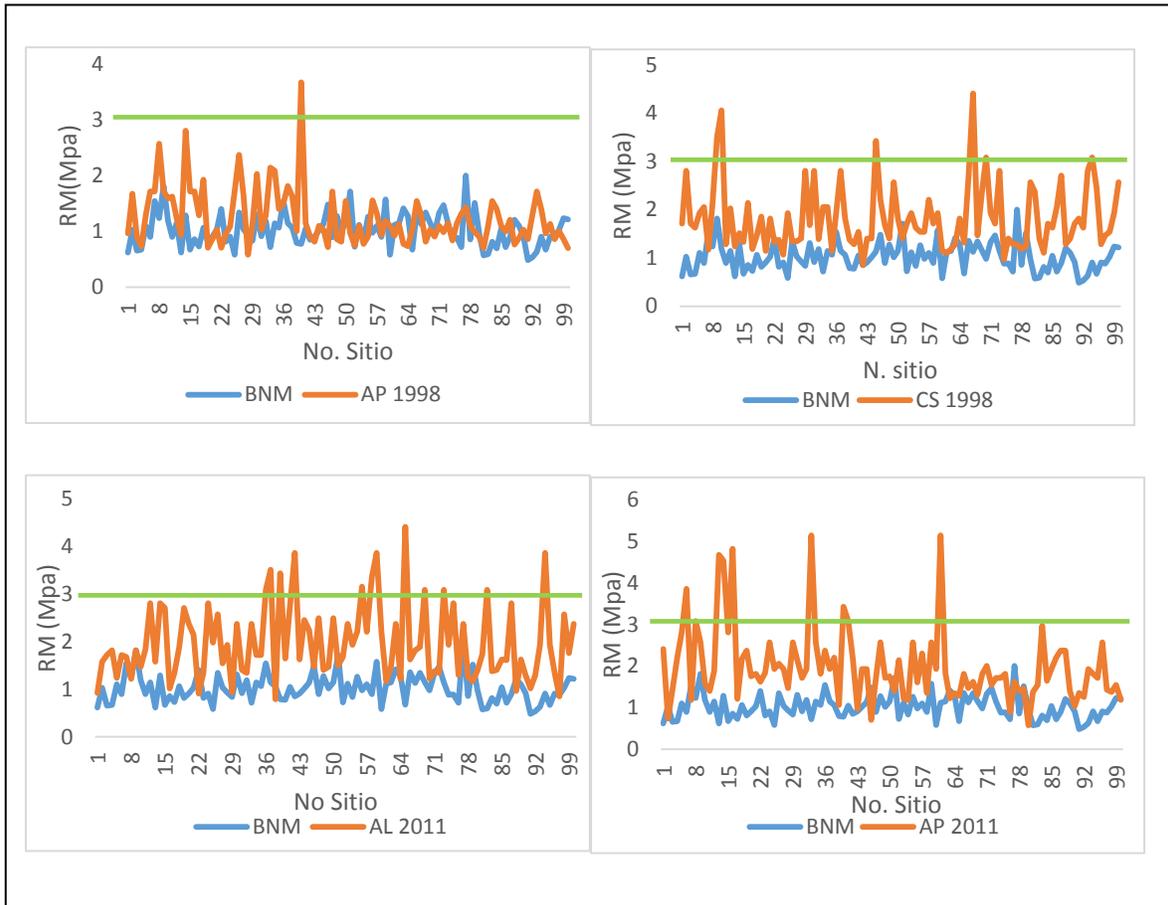


Figura 3.3. Resistencia Mecánica para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados comparados con el bosque no manejado en la comunidad de Santa Catarina Ixtepeji. BNM= Bosque sin Manejado, AP=Árboles Padre, AL=Aclareo Ligero, CS= Cortas de Selección. La línea verde horizontal indica el límite crítico de resistencia (Gómez *et al.*, 2002)

La prueba de t de Student entre los tratamientos silvícolas árboles padre 1998 y 2011 mostró que éstos son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$); el tratamiento árboles padre 1998 tiene una menor resistencia, lo que muestra probablemente las áreas sometidas a manejo después de un periodo de tiempo corto, su resistencia mecánica comienza a estabilizarse. El área bajo manejo se está

recuperando de los daños físicos que se asume varían en relación a la intensidad de manejo y al periodo de recuperación del área.

Cuando existe daño físico, el suelo incrementa su resistencia mecánica; el aumento en la resistencia mecánica está en función de la intensidad de manejo así como también las condiciones del sitio; en los tratamientos silvícolas evaluados se puede observar que con el paso del tiempo las áreas sometidas a manejo comienzan a recuperarse. Sin embargo, los valores encontrados en los sitios de estudio donde la textura es media todavía no son críticos por estar debajo de 3 MPa (Gómez *et al.*, 2002) pero ya se muestran indicios de una perturbación seria.

El análisis de varianza realizado indica que existen diferencias altamente significativas en la variable resistencia mecánica entre los tratamientos silvícolas (Cuadro 3.2).

La prueba de Tukey muestra que la resistencia mecánica en el tratamiento de Árboles padre 1998 y el bosque sin manejo se presentan los valores menores (1.02 y 1.24 MPa, respectivamente) y no son estadísticamente diferentes entre sí ($P < 0.05$). Sin embargo, estos son diferentes al resto de los tratamientos, es decir, Árboles Padre 2011, Aclareo Ligero 2011 y Cortas de Selección 1998, que presentan los valores más altos de resistencia mecánica y que forman otro grupo que no son diferentes entre sí ($P < 0.05$) (Figura 3.4).

En la

5 se observar el comportamiento de la resistencia mecánica en cada uno de los tratamientos silvícolas, en donde los valores de resistencia mecánica en el bosque sin manejo y en árboles padre 1998, están en un intervalo de 1.8 MPa a 2 MPa. Los tratamientos árboles padre 2011 y aclareo ligero 2011 son los que presentan mayor resistencia mecánica con valores superiores a 2 MPa. En algunos puntos, la resistencia mecánica es mayor a 3 MPa que de acuerdo con Bravo y Andreu (1995), bajo esta condición, hay una restricción del crecimiento de la raíz. Los estudios de RM en suelos forestales en México son escasos; por ejemplo

(Vázquez *et al.*, 2010) encontraron que la RM fue de 1.0 MPa en un bosque de pino-encino. Los estudios de esta variable han sido reportados mayormente en suelos dedicados a la agricultura (Mora *et al.*, 2001). Así mismo se ha encontrado que la RM varía en función de la profundidad en la que se mide. Por ejemplo se ha encontrado que a 10 cm de profundidad la RM fue de 1MPa y ésta aumento a 2 MPa a los 30 cm de profundidad (Potter y Chichester, 1993; Vidal, 1994; Cassel *et al.*, 1995; Varza *et al.*, 1997)

La resistencia a la penetración es, junto con la porosidad, la variable más importante en los estudios sobre la compactación del suelo en relación con el enraizamiento (Barraclough *et al.*, 1991). Se ha señalado que la principal ventaja de medir la resistencia mecánica con un penetrómetro es la rapidez en la obtención de datos (Breune *et al.*, 1996), esta característica le permite ser una herramienta de diagnóstico inicial sobre la condición física del suelo.

Cuadro 3.2. Suma de cuadrados y cuadrados medios del análisis de varianza para la resistencia mecánica de tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji.

F. V.	SC	Gl	CM	F	Pr>F
Modelo	80.53	4	20.13	46.56	<0.0001
Tratamiento	80.53	4	20.13	46.56	<0.0001
Error	214.07	495	.43		
Total	294.61	499			

F.V.= Fuente de Variación, SC= Suma de Cuadrados, Gl= grados de libertad, CM= Cuadrados Medios, F= F calculada, Pr>F= Significancia.

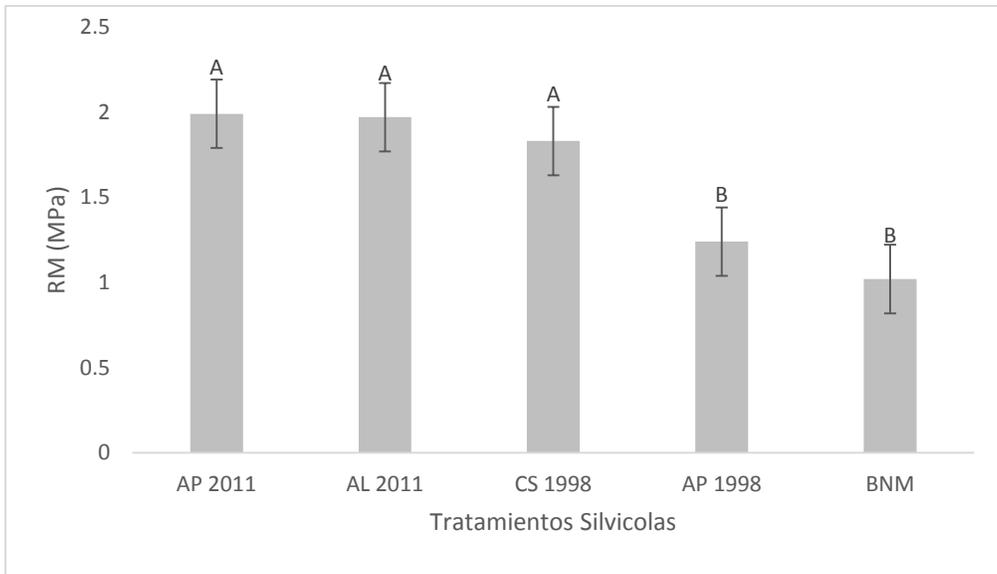


Figura 3.4. Comparación de valores medios y error estándar de la resistencia mecánica para cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji. Letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), BNM= Bosque no Manejado, CS=Cortas de Selección, AL= Aclareo Ligero, AP=Árboles Padre.

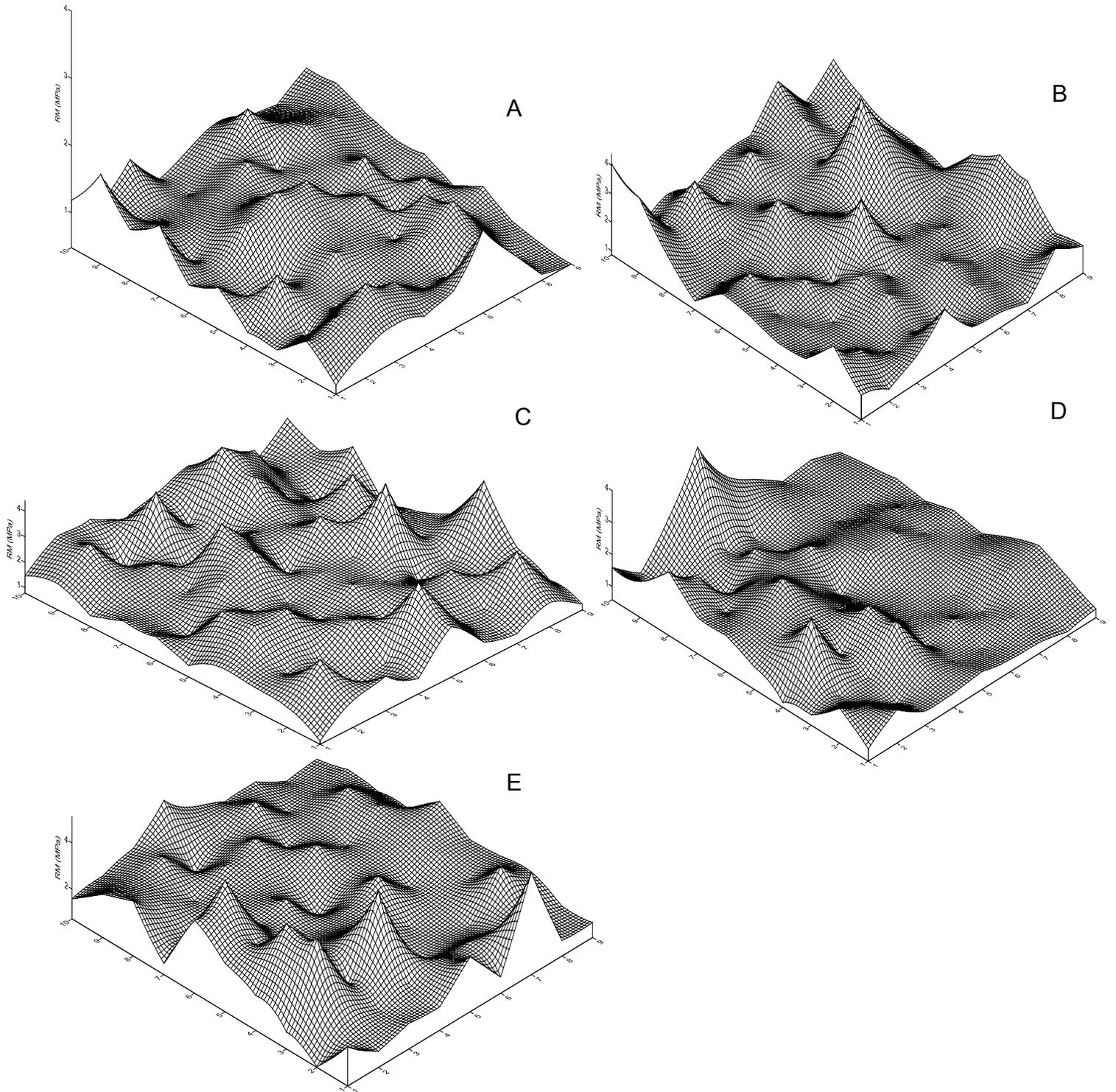


Figura 3.5. Representación tridimensional de la resistencia mecánica para los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji. A= Bosque sin Manejado, B= Cortas de Selección 1998, C=Árboles Padre 2011, D= Árboles Padre 1998, E= Aclareo Ligero 2011

3.7.3 Humedad del suelo

El cambio de la humedad del suelo es dinámico y depende de varios factores como son la precipitación, la capacidad de infiltración y la época del año en la que se toman los datos. En este estudio, los datos de humedad de suelo fueron tomados en primavera y las mediciones se realizaron en la época de crecimiento de los árboles y en fechas cercanas (diferencias no mayores a 1 día), por lo que se asume que las diferencias de humedad se deben al efecto del tratamiento en el sitio.

Para ver las diferencias en humedad del suelo se realizó un análisis de varianza entre los tratamientos silvícolas evaluados encontrándose que existen diferencias altamente significativas de ésta variable entre los tratamientos silvícolas (Cuadro 3.3).

La prueba de Tukey muestra que existen diferencias estadísticas en contenido de humedad del suelo entre tratamientos. En los tratamientos de Árboles padre 1998, árboles padre 2011 y en el bosque sin manejo los valores de humedad en el suelo no fueron estadísticamente diferentes entre sí ($P < 0.05$), pero son diferentes a los valores en los tratamientos de Aclareo Ligero 2011 y Cortas de Selección 1998, iguales estadísticamente entre sí ($P < 0.05$) (

6).

Cuadro 3.3. Suma de cuadrados y cuadrados medios del análisis de varianza para la humedad del suelo de tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji.

F. V.	SC	Gl	CM	F	Pr>F
Modelo	1687.89	4	421.97	5.26	<0.0007
Tratamiento	1687.89	4	421.97	5.26	<0.0007
Error	7622.37	95	80.24		
Total	9310.25	95			

F.V.= Fuente de Variación, SC= Suma de Cuadrados, Gl= grados de libertad, CM= Cuadrados Medios, F= F calculada, Pr>F= Significancia.

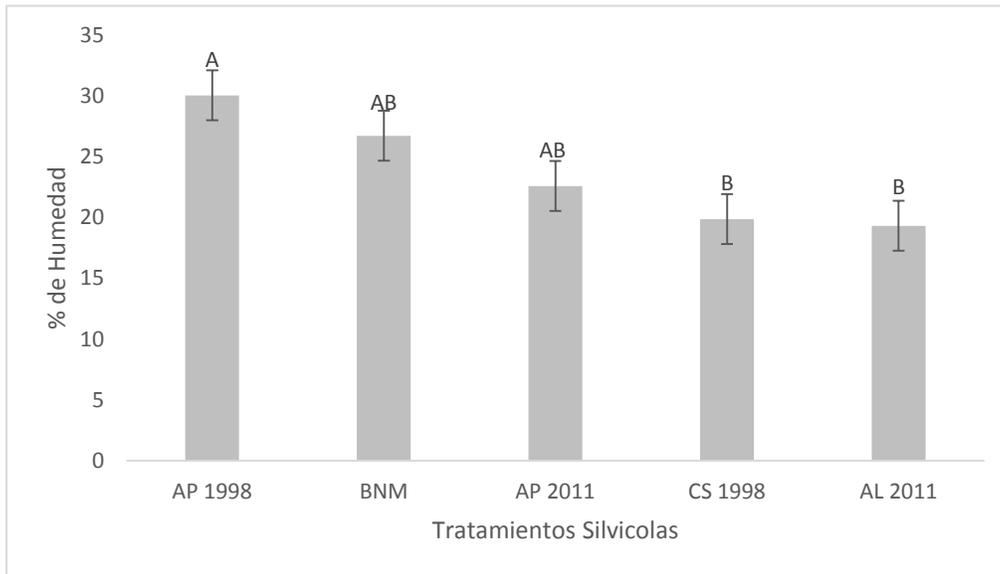


Figura 3.6. Comparación de valores medios de la humedad del suelo en cada uno de los tratamientos silvícolas evaluados en Santa Catarina Ixtepeji. Letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$), BNM= Bosque sin Manejo, CS= Cortas de Selección, AP= Árboles Padre, AL= Aclareo Ligero.

La humedad del suelo presentó variaciones en todos los tratamientos silvícolas, la comparación de la humedad fue en cuanto a las mediciones tomadas en campo y no en relación a la época en la que se tomaron los datos; los análisis se realizaron de acuerdo al efecto del tratamiento silvícola.

En otros casos sin embargo, se ha encontrado que la humedad varía de acuerdo al tipo de manejo al que es sometido el suelo, el tipo de suelo, y los factores ambientales como la precipitación (Mulumba y Lal, 2008).

Los resultados indican que la mayoría de los suelos que sostienen algún tipo de vegetación, tienen la habilidad de absorber humedad a velocidades rápidas, propiedad que se pierde al pero el tipo de práctica y fecha de aplicación afectan dicha capacidad. Esta pérdida se debe en parte a la eliminación de materia orgánica y su consecuente reducción en la actividad biótica, a la exposición directa a las gotas de lluvia, con la subsecuente reducción de los agregados, y al

taponamiento de los macro y microporos por la escorrentía que lleva la suspensión de materiales finos (Worrell y Hampson, 1997). La evapotranspiración en cada tratamiento silvícola también influye en la capacidad de almacenamiento de agua. Por ejemplo, el bosque no manejado con mayor demanda de agua por los árboles tiende a tener menor humedad que un sitio en el que se aplicó una corta de árboles padres.

En la agricultura, aplicando no labranza los valores de densidad pueden aumentar, disminuir o permanecer indiferentes de acuerdo al cultivo, al tipo de suelo, y a los manejos al que es sometido, a la vez que puede influir sobre otras propiedades del suelo como la infiltración y la porosidad (Cavalieri *et al.*, 2009).

3.8 CONCLUSIONES

Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos silvícolas evaluados, donde el tratamiento Árboles Padre 1998 y bosque sin manejo fueron los que tuvieron una menor densidad aparente. Este resultado se explica porque con el paso de los años el suelo de las áreas intervenidas se recupera y tiende a las condiciones iniciales. En términos de densidad aparente del suelo la resiliencia es de aproximadamente 10 años.

La resistencia mecánica del suelo tuvo variaciones en todos los tratamientos silvícolas evaluados el bosque sin manejo fue el que presentó menor RM seguido del tratamiento árboles árboles padre 1998 en comparación con los tratamientos más recientes estos su resistencia mecánica fue mayor por lo que se concluye que después de un periodo de tiempo el suelo comienza a recuperarse.

La mayor humedad se presentó en el bosque sin manejado y el tratamiento árboles padre al igual que las variables de densidad aparente y humedad del suelo. La demanda de evapotranspiración explica este resultado. El bosque sin manejo con mayor demanda de agua por los árboles tiende a tener menor humedad que un sitio en el que se aplicó una corta de árboles padres. En el resto de los tratamientos, el incremento en densidad aparente limita la infiltración y el contenido de agua tiende a ser menor con respecto al bosque no manejado.

De acuerdo a los tratamientos silvícolas, las tres variables evaluadas, densidad aparente, resistencia mecánica y humedad, indican que el tratamiento silvícola aplicado en el área de estudio no afecta de forma irreversible la condición física del suelo. Sin embargo, se requiere dar oportunidad a la recuperación física del suelo después de cada intervención del bosque.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados encontrados muestran que el aprovechamiento forestal modifica la diversidad y composición de los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo; el sotobosque (arbustos y herbáceas) es el más diverso en bosques manejados y no manejados por lo que es importante evaluarlo porque contribuye a la explicación de la diversidad vegetal total en el bosque.

De acuerdo a las propiedades de suelo evaluadas en los diferentes tratamientos silvícolas, las tres variables evaluadas, densidad aparente, resistencia mecánica y humedad, indican que el tratamiento silvícola aplicado en el área de estudio no afecta de forma irreversible la condición física del suelo. Sin embargo, se requiere dar oportunidad a la recuperación física del suelo después de cada intervención del bosque.

CAPÍTULO 5 LITERATURA CITADA

- Abardía, F., y C. Solano. 1995. Comunidades Forestales Oaxaqueñas: Lucha por el mercado libre maderero. Institute for Enviromental Studies. Universidad de Wisconsin, Madison. USA 17 p.
- Acevedo R., R. 1998. Estudio sinecológico del bosque de *Pseudotsuga menziessi* (Mirb.) Franco var. *oaxacana* Debreczy & Rácz, en la zona de Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca, México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, México. 105 p.
- Acosta V., H., P. Araujo A., y M. Iturre C. 2006. Caracteres estructurales de las masas. Universidad Nacional de Santiago de Estereo. Facultad de Ciencias Forestales. Cátedra de Sociología Vegetal y Fitogeografía Forestal. 35 p.
- Ajbilou, R., T. Marañon, y J. Arroyo. 2003. Distribución de clases diamétricas y conservación de bosques en el norte de Marruecos. Investigación. Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 12:111-123.
- Aguirre C., O. A. 2004. Índices para la caracterización de la estructura del estrato arbóreo de ecosistemas forestales. Ciencias Forestales en México 27: 5-27.
- Aguirre C., O. A., J. Corral R., B. Vargas L., B., y J. Jiménez P. 2008. Evaluación de modelos de diversidad-abundancia del estrato arbóreo en un bosque de niebla. Revista Fitotecnia Mexicana 31: 281-289.
- Aguirre, O., H. Kramer, y J. Jiménez. 1998. Structural studies in a pine thinning experiment northern Mexico. General Forestry and hunting newspaper 168: 213-219.
- Aguirre, O., H. Hui G., K. Gadow, and J. Jiménez. 2003. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. Forest Ecology and Management 183: 137-145.
- Alameda, D. 2010. Ecophysiological implications of soil compaction on plant development. Journey to the center of the soil Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. 165 p.
- Alanís R., E., J. Jiménez P., A. Valdecantos-Dema, M. Pando M., O. A. Aguirre C., y E. J. Treviño G. 2011. Caracterización de la regeneración leñosa post-incendio de un ecosistema templado del parque ecológico Chipinque,

- México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 17: 31–39.
- Álvarez G., J. G., J. Schröder, R. Rodríguez S., and A. D. Ruiz G. 2002: Modelling the effects of thinnings on the diameter distribution of even-aged Maritime pine stands. *Forest Ecology and Management* 165: 57-65.
- Andersen, L., y R. Mamani. 2009 Cambio Climático en Bolivia hasta 2100: Síntesis de Costos y Oportunidades. Documento para el Estudio Regional de Economía del Cambio Climático en Sudamérica (ERECC-SA). CEPAL. 41 p.
- Anta F., S. 2000. Conservación y Manejo Comunitario de los Recursos Forestales en Oaxaca. Semarnap-Procymaf. Oaxaca, Oaxaca. 19 p.
- Aus der Beek, R., G. Saenz. 1992. Manejo forestal basado en la regeneración natural del bosque. Estudio de caso de los robledades de altura de cordillera de Talamanca, Costa Rica. Informe Técnico no. 200. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 48 p.
- Bacchi, O. y K. Reichardt. 2003. Sondas de neutrones y gamma: Sus aplicaciones en agronomía. Segunda edición. Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena. Impreso por OIEA en Australia. 83 p.
- Barraclough, P. B., A. H. Weir y H. Kuhlmann. 1991. Factors affecting the growth and distribution of winter wheat roots under UK field conditions. pp. 410-417. In: McMichael B.I. y H. Persson (ed.). *Plant roots and their environment*. Proceedings of an ISSR symposium, 21-26 August, 1988, Uppsala, Sweden. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- Booco, G., A. Velázquez, y Torres A. 2000. Comunidades indígenas y manejo de recursos naturales. Un caso de investigación participativa en México. *Interciencia* 25: 9-19.
- Brady, N. C, and R. W. Weil. 1999. *The nature and properties of soils*. 12^a. ed. Prentice Hall. N.J. USA. 750 pp.
- Bravo, C. y E. Andreu. 1995. Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un alfisol del estado Guárico, Venezuela bajo dos sistemas de labranza. *Venesuelos* 3: 62-68.

- Brokaw N., V. L., and R. Lent. 1999. Vertical structure. In: Hunter, M.L. (Ed). Maintaining biodiversity in forest ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 373-399 p.
- Breune, I., M. C. Nolin, J. Caron, and S. Tessier. 1996. The penetrometer and its use in the characterization of the soil quality. *Agrosol* 9: 13-21.
- Burger, J. A., and D. L. Kelting. 1999. Using soil quality indicators to assess forest stand management. *Forest Ecology and Management* 122: 155–166.
- Cabalceta A., G. 2009. Propiedades físicas del suelo. Densidad aparente y de partículas. Centro de investigación Agronómicas. Universidad de Costa Rica. 16 p.
- Caldato L., S., N. Vera, y P. Donagh M. 2003. Estructura poblacional de *Ocotea puberula* en un bosque secundario y primario de la selva mixta misionera. *Ciencia Forestal* 13: 25-32.
- Campbell, D. J. 1994. Determination and use of dry bulk density in relation to soil compaction. In: Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering 11 (Soane B D; van Ouwerkerk C, eds), pp 113–139.
- Canizales V., P. A., E. Alanís R., R. Aranda R., J. M. Mata B., J. Jiménez P., G. Alanís F., J. I. Uvalle S., y M. G. Ruiz B. 2009. Caracterización estructural del matorral submontano de la sierra Madre Oriental Nuevo León, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15: 115-120.
- Cassel, D. K., C. W. Raczkowski, and H.P. Denton. 1995. Tillage effects on corn production and soil physical conditions. *Soil Science Society Agronomy* 59: 1436-1443.
- Castellanos B., J. F., E. J. Treviño G., O. A. Aguirre C, J. Jiménez P., M. Musalem S., M., y R. López A. R. 2008. Estructura de bosques de pino patula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 14: 51–63.
- Cavaliere V., K. M., A. Pires S., C. A. Tormena, T. Paiva L., A. R. Dexter, and I. Hakansson. 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. *Soil Till. Res.* 103: 158 – 164.

- Centeno, E. R. y M. Ruiz Z. 1993. Inducción de la regeneración natural de *Cedrela odorata* L. a través de fuego controlado. I Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales. Memoria. Saltillo Coahuila. 57 p.
- Chandy, S., D. J. Gibson, and P. A. Robertson, 2006. Additive partitioning of diversity across hierarchical spatial scales in a forested landscape. *Journal of Applied Ecology*. 43: 792-801.
- Chávez, E. 2005. Programa Operativo Anual de la Unidad Productora de Materias Primas Forestales "Santa Catarina Ixtepeji" (UPMPF). Comisariado de Bienes Comunales de Santa Catarina Ixtepeji-WWF. Oaxaca, Oax. 187 p.
- Condés, S. 1997. Simulación de parcelas arboladas con datos del 2 Inventario Forestal Nacional. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid. 616 p.
- Corral R., J. J., O. A. Aguirre C., J. Jiménez P., y S. Corral R. 2005. Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el bosque mesófilo de montaña "El Cielo", Tamaulipas, México. *Investigación Agraria: Sistema de Recursos Forestales* 14: 217-228.
- Corral R, J. J., C. Wehenkel, H. A. Castellanos B., B. Vargas L., and U. Diéguez A. 2010. A permutation test of spatial randomness: application to nearest neighbor indices in forest stands. *Journal of Applied Ecology* 15: 218-225.
- Corella J., F., J. I. Valdez H., V. M. Cetina A., F. V. González C., A. Trinidad S. y J. R. Aguirre R. 2001. Estructura forestal de un bosque de mangles en el noreste del Estado de Tabasco, México. *Ciencia Forestal en México* 26(90): 73-102 p.
- Craigg, T. L., and S. W. Howes. 2007. Assessing quality in volcanic ash soils. En: PageDumroese, D.S.; Miller, R.E.; Mital, J., et ál, tech. eds. Volcanic-ash-derived forest soils of the Inland Northwest: properties and implications for management and restoration. Proceedings, Volcanic-Ash-Derived Forest Soils of the Inland Northwest: Properties and Implications for Management and Restoration. RMRS-P-44. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 47–67 p.
- Clayton, J.L., G. Kellogg, N. Forrester. 1987. Soil disturbance-tree growth relations in central Idaho clearcuts. Research Note INT-372. Ogden, UT: U.S.

Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 6 p

- Clutter L., J., J. Fortson C., L. Pienaar V., and R. Bailey L. 1992. Timber management. A quantitative approach. 2nd ed Krieger. John Wiley and Sons, Inc. New York. 333 p.
- Curtis T., J., and P. McIntosh R., 1951. An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology* 32: 476-496.
- Decoq, G. 2002. Patterns of plant species and community diversity at different organization level in a forested riparian landscape. *Journal of Vegetation Science* 13: 91-106.
- Del Castillo, R. F., J. A. Pérez de la Rosa, V. G. Vargas A., y R. Rivera G. 2004. Coníferas. En: A. J. García-Mendoza; M. Ordoñez y M. Briones (eds.), Biodiversidad de Oaxaca, México, Instituto de Biología, Universidad Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, México.
- Del Río, M., F. Montes, I. Cañellas y G. Montero. 2003. Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 12: 159-176.
- Díaz, G., O. Castillo A., y G. García. 2002. Distribución espacial y estructura arbórea de la selva baja subperenifolia en un ejido de la reserva de la biosfera en Calakmul, Campeche, México. *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Universidad y Ciencia.* 18: 11-28.
- Donoso Z, C. 1992. *Ecología forestal*. Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. En: Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. F., et ál., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Spec. Pub. 35. Madison, WI: Soil Science Society of America: 3–11.
- Encina D., J. A., A. Zarate L., J. Valdez R., y J. A. Villareal Q. 2007. Caracterización ecológica y diversidad de los bosques de encino de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 81:51-63.

- FAO, 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales, 2010 Informe principal. Estudio FAO Montes 163. Roma (Italia). (Disponible también en www.fao.org/forestry/fra/fra2010/en/)
- Fisher, R. F. and D. Binkley, 2000. Ecology and Management of Forest Soil. 3d ed. John Wiley & Sons, New Your. 489 p.
- Franklin, J. F., T. A. Spies, R. Van Pelt, A. B. Carey, D. C. Shaw, K. Bible and J. Chen, 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *Forest Ecology and Management* 155:399-423.
- Fredericksen, N. J. y T. S. Fredericksen. 2000. Respuesta de la fauna terrestre al aprovechamiento forestal y los incendios en un bosque húmedo tropical en Bolivia. Chemonics International. BOLFOR. Santa Cruz, Bolivia. 25 pp.
- Froehlich, H. A. 1976. The influence of different thinning systems on damage to soil and trees. Proceedings, XVI IUFRO World Congress Division IV. Oslo, Noruega: International Union of Forest Research Organizations: 333–334.
- Fassbender, H. W. 1996. Modelaje de la Fertilidad del Suelo y de la Productividad de Sistemas de Producción Agropecuarios en América Latina. Conferencia Comisión 4 y 8: Fertilidad de suelos y Nutrición Mineral de Plantas. Fertilizantes y Correctivos. XIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Aguas de Lindoia, Sau Paulo, Brasil. CD support.
- Fox, T. 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management* 138: 187–202.
- Frumhoff, P. 1995. Conserving wildlife in tropical forest managed for timber. *BioScience* 45: 456-464.
- Gadow, K. V., and G. Hui, 1999. Modelling Forest Development Kluwer Academic publishers. 213 pp.
- Gadow, K. V., P. Real, y J. Álvarez G. 2001. Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. *UIFRO Worldl Series* 12: 242-.
- Gallardo C., J. A., J. A. Meave, y E. A. Pérez G. 2005. Estructura y diversidad de la selva baja caducifolia del Cerro Verde Nizanda (Oaxaca), México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 76: 19-35

- García N., F. J., R. Tapias M., M. Fernández M., F. J. Vázquez P., y M. L. Salvador N. 2010. La biodiversidad como herramienta en la gestión y certificación forestal zonas de alto valor de conservación en montes madereros del sureste peninsular. *Boletín Informativo CIDEU* 8:57-73.
- García M., A. J., y J .A. Meave. 2011. Diversidad Florística de Oaxaca: De musgos a angiospermas (colección y lista de especies). Universidad Nacional Autónoma de México- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 352 p.
- Gavilán, R. G., y Rubio, A. 2005. ¿Pueden los índices de diversidad biológica ser aplicados como parámetros técnicos de la gestión forestal? *Sociedad Española de Ciencias Forestales* 20:93-98.
- Graciano, J. J., 2001. Técnicas de evaluación dasométricas y ecológica de los bosques de coníferas bajo manejo de la Sierra Madre Occidental del centro sur de Durango, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Linares, N. L., México. 153 p.
- Grigal, F. 2000. Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology Management* 138: 167-185
- Godínez I., O., y L. López M. 2002 Estructura, composición, riqueza y diversidad de árboles en tres muestras de selva mediana subperennifolia. *Anales del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Botánica* 73: 283-314.
- Gómez, G. A., R. F. Powers and M. J. Singer. 2002. Soil compaction effects on growth of Young ponderosa pine following litter removal in California' S Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal* 66:1334-1343.
- Harper, K. A., and S. E. Mac Donald. 2002. Structure and composition of edges next to regenerating clear-cuts in mixed-wood boreal forest. *Journal of Vegetation Science* 13 :(55) 535-546.
- Hartshorn, G. S. 1980. Neotropical forest dynamics. *Biotropica*. 12:23-30
- Hernández S., J. A., Aguirre C., O. A. E. Alanís R., J. Jiménez P., J., E. J. Treviño G., M. A. González T., C. Luján A., J. M. Olivas G., y L. A. Domínguez P. L. 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: 189-199.

- Hessen M., D. 2001: Models for growth and thinning simulation in Göttingen Beech forest on limestone. Dissertation, Department of Forest and Forest Ecology, University of Göttingen. Logos Verlag, Berlin.
- Hunter M., L. J. 1990. Wildlife, forest, and forestry. Principles of managing forests for biological diversity. Prentice Hall, New Jersey. 370 p.
- INAFOR (Instituto Nacional Forestal de Nicaragua). 2006. Elaboración de planes de manejo y planes operativos de aprovechamiento en bosques húmedos latifoliados. Nicaragua. 28 p.
- Jiménez, J., Aguirre O., y Kramer H. 2001. Análisis de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 10: 355–366.
- Kimmins, J. P. 1999. *Forest Ecology: A Foundation for sustainable. Management and Environmental Ethics in Forestry*. Prentice Hall. New Jersey, USA. 611 p.
- Koleff, P., K. J. Gaston, and J. J. Lennon. 2003. Measuring beta diversity for presence-absence data. *Journal of Animal Ecology* 72:367-382
- Koleff, P. 2005. Conceptos y medidas de la diversidad beta. En: G. Halffter, J. Soberón, P. Koleff y A. Melic (eds.) *Sobre Diversidad Biológica: el significado de la diversidades alfa, beta y gamma*. m3m: Monografías Tercer Milenio, Sociedad Entomológica Aragonesa, Zaragoza. 19-40p.
- Krüger H., S. Venanzi y E. de Sá Pereira. 2009. Resistencia mecánica del suelo en secuencias de cultivos agrícolas y mixtas bajo siembra directa. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. Argentina. 7 p.
- Lamprecht, H. 1990. *Silvicultura en los Trópicos: Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas; posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*. Ed. Gtz. Alemania. 345 p.
- Lampurlanés, J., and C. C. Martínez. 2003. Tillage. Soil Bulk Density and Penetration Resistance under Different Tillage Soil Bulk Density and Penetration Resistance under Different Tillage and Crop Management Systems and Their Relationship with Barley Root Growth. Spain. *Agron. J.* 95:526-536.

- Leyva L., J. C., A. Velázquez M., y G. Ángeles P. 2010. Patrones de diversidad de la regeneración natural en rodales mezclados de pino. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 16: 227–239.
- León A., R. 2003 *Manual edafológico de campo*. 2ª. Ed. Textos Universitarios, Universidad Veracruzana. México. 205 p.
- López, A., I., F. Chagollan A., J. Del Campo A., R. García R., I. Contreras G. y R. García V. 2006. *Ecología*. 1ª Edición. Umbral Editorial, S. A. de C. V. México. 133 p.
- Louman, B., D. Quirós, y M. Nilsson. 2001. *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 263 p.
- Magurran, A. E. 1988. *Ecological Diversity and its Measurement*. Princeton University Press. Princeton, New Jersey. 175 p.
- Magurran, A. E. 2004. *Measuring biological diversity*. Oxford, UK.: Blackwell publishing company. [http:// books.google.es/books?id= HoOAAAAQAAJ&h=es&source=gbs_similarbooks](http://books.google.es/books?id=HoOAAAAQAAJ&h=es&source=gbs_similarbooks).
- Margalef, R. 1972. Homage to Evelyn Hutchinson, or why there is an upper limit to diversity. *Transactions Academy of Art and Sciences* 44:211-235.
- Martin, P. H., R. E. Sherman, and T.J. Fhaey. 2004. Forty years of tropical forest recovery from agriculture. Structure and floristic of secondary and old-growth riparian forests in the Dominican Republic. *Biotropica* 36:3-297.
- Mejía D., N. R, J. A. Meave, y C. A. Ruiz J. 2004. Análisis estructural de un bosque mesófilo de montaña en el extremo oriental de la Sierra madre del Sur (Oaxaca), México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 74:13-29.
- Miranda R, A. 1999. *Biodiversidad: Factores que la afectan en la Biósfera e Índices de Diversidad*. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. 55 p.
- Moffat, A. J. 2003. Indicators of soil quality for U.K. forestry. *Forestry* 76: 547-568.
- Molina F., A., y B. Finegan. 2002. Efectos de borde en la vegetación de remanentes del bosque muy húmedo tropical en el norte de Costa Rica, y

sus implicaciones para el manejo y la conservación. *Revista Forestal Centroamericana*. 43 p.

Mora, M., V. Ordaz, J. Z. Castellano, A. Aguilar S., F. Gavi, y V. Volke H. 2001. Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un vertisol, después de cuatro años de manejo. *Terra Latinoamérica* 19: 67-74.

Moreno, C. E. 2001. Métodos para medir la biodiversidad. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Oficina Regional de Ciencia y tecnología para América Latina del Caribe, UNESCO. Sociedad Entomologica Aragonesa (SEA). Gordi. España. 82 p.

Morris, L. A., and R. E. Miller. 1994. Evidence for long-term productivity change as provided by field trials. En: Dyck, W.J., ed. *Impacts of forest harvesting on long-term site productivity*. Londres, Reino Unido:Chapman & Hall 41–80.

Mostacedo, B. 2000. Respuesta de las plantas a la intensidad de aprovechamiento en un bosque semideciduo pluviestacional de la región de Lomerio, Santa Cruz, Bolivia. *Revista de la Sociedad Boliviana de Botánica* 1: 75-88.

Murray N, R. M., J. Bojórquez S., A. Hernández J., G. Orozco M., D. García J., R. Gómez A., H. Ontiveros G., y J. Aguirre, O. 2011. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. *Revista Bio ciencias* 1: 27- 35.

Mueller D., D., y H. Ellenberg. 1974. *Aims and methods of vegetation ecology*. John Wiley, Nueva York. 547 p.

Mulumba, L. N, and R Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 98: 106 – 111.

Musálem, M., y A. Fierros, 1996. *Curso de Silvicultura de Bosques Naturales*. México, D.F. Universidad Autónoma de Chapingo.

Musálem, M., A. Velázquez M., y M. González G. 1991. Repoblación natural de Bosques templado-fríos en la región central de México. *Agrociencia Serie Recursos Naturales Renovables* 1: 55-75.

- Návar C., J. J., y S. González E. 2009. Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica* 27:71–87.
- Nebel, G., J. Dragsted, and J. K. Vanclay. 2000. Estructura y composición florística del bosque de la llanura aluvial inundable de la amazonia peruana: II. El sotobosque de la restinga. *Folia Amazonia* 10: 151-182.
- Núñez S., J. 2000. Fundamentos de la edafología. Editorial EUNED. San José, Costa Rica. 148 p.
- Onaindia, M., I. Domínguez, I. Albizu, C. Garbisu and I. Amezaga. 2004. Vegetation diversity and vertical structure as indicators of forest disturbance. *Forest Ecology and Management* 195: 341-354.
- Ortiz P, M. A., J. R Hernández S., y J. M. Figueroa M. 2004. Reconocimiento fisiográfico y geomorfológico. En: García–Mendoza A.J., Ordóñez–Díaz M. J. y Briones–Salas M. A. Eds. Biodiversidad de Oaxaca, pp.43–54, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, México D.F.
- Page-Dumroese, D., M. Jurgensen, W. Elliot, T. Rice, J. Nesser, T Collins, and R. Meurisse. 2000. Soil quality standards and guidelines for forest Sustainability in northwestern North America. *Forest Ecology and Management* 138: 445–462.
- Passioura, J. B. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environment* 25:311-318.
- Peña, C. 2003. Changes in forest structure and species composition during secondary forest succession in the Bolivian Amazon, *Biotropica* 35: 450-461.
- Philip, M. 1994. Tree and forests measuring. 2nd Edition. Cab Internacional. 191p.
- Pielou, E. C., 1997. Biodiversity versus old–style diversity measuring biodiversity for conservation. In: Measuring and monitoring biodiversity in tropical and temperate forests. *Proceedings of a IUFRO Symposium held at Chiang Mai, Thailand August 27th– September 2nd, 1994*, pp. 5–17.
- Pinazo, M. A., N. I. Gasparri, J. F. Goya, y M. F. Arturo. 2003. Caracterización estructural de un bosque de *Podocarpus parlatore* y *Juglans australis* en Salta Argentina. *Revista de la Biología Tropical* 51: 361-368

- Pretzsch, H. 1998. Structural diversity as a result silvicultural operations. *Lesnictvi-Forestry* 44: 429-439.
- Potter, K. N. and F. W. Chichester. 1993. Physical and chemical properties of a Vertisol with continuous controlled-traffic, no-till management. American Society of Agricultural Engineers. USA.
- Powers, R. F., D. H. Alban, R. E. Miller. 1990. Sustaining site productivity in North American forests: problems and prospects. En: Gessel, S.P., Lacate, D.S., Weetman, G. F. Sustained productivity of forest soils. Proceedings, 7th North American Forest Soils Conference. Vancouver, Columbia Británica: University British Columbia, Faculty of Forestry: 49–79.
- Powers, R. F., A. E. Tiarks, and J. R Boyle. 1998. Assessing soil quality: practical standards for sustainable forest productivity in the United States. En: Adams, M.B., Ramakrishna, K., Davidson, E. The contribution of soil science to the development and implementation of criteria and indicators of sustainable forest management. SSSA Spec. Publ. 53. Madison, WI: Soil Science Society of America: 53–80.
- Puumalainen, J., 1996. The beta function and its analytical parameter determination for the representation of diameter distributions. Dept. of Forest Management, Univ. Göttingen. 96 p.
- Ramírez R., P. y C. S. Jiménez. 2009. Cambios en la resistencia a la penetración en un suelo con diferentes sistemas de manejo y su relación con algunas propiedades físicas en un andisol-marinilla la montaña. Universidad de Colombia, Escuela de Goeciencias, Documento de la materia de manejo y conservación de suelos. Colombia, Sede de Medellín. 22 p.
- Ramírez S., R. 2006. Efecto de la aplicación de dos métodos de regeneración sobre la estructura, diversidad y composición de un bosque de pino-encino en la Sierra Juárez de Oaxaca, México. Tesis de maestría. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 97 p.
- Reichert, J. M., L. E. A. Sánchez, D. J. Reinert, R. Horn, and I. Hakansson. 2009. Reference bulk density and critical degree of compactness for no till crop production in subtropical highly weathered soils. *Till. Res* 102: 242-254.

- Rozas, V. 2002. Estructura y patrones de regeneración de roble y el haya en un bosque maduro de litoral occidental de Cantabria. *Investigación Agrícola. Sistemas de Recursos Forestales* 11: 107-136.
- Tang, X. and S. X. Chang. 2007. Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil. *Soil Till. Res.* 93: 77-86
- Thiollay, J. 1992. The influence of selective logging on bird species diversity in a Guianan rain forest. *Conservation. Biology* 6: 47-63.
- Tirado R., C. 2005. Efecto de la compactación del suelo en el desarrollo de especies forestales utilizadas para la reforestación urbana. Tesis de Maestría, Universidad de Puerto Rico, Recinto universitario de Mayagüez, Puerto Rico, 107 p.
- Torras, O., and S. Saura. 2008. Effects of silvicultural treatments on forest biodiversity indicators in the Mediterranean. *Forest Ecology and Management* 255: 3322-3335.
- Torres, D., G. Lorena, y Navarro C. 2008. *Forestaría Análoga: Principios e implementación*. Taller de la Red Internacional de Forestaría Análoga (RIFA). Manual Técnico. República Dominicana. 55 p.
- Sánchez R., E. V., L. López M., E. García M., y R. Cuevas G. 2003. Estructura y composición florística y diversidad de especies leñosas de un bosque Mesófilo de Montaña en la sierra de Manantlán, Jalisco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 73:17-34.
- Seaby, R. M. H., and P. A. Henderson. 2006. *Species Diversity and Richnes Version 4*. Pisces Conservation Ltd., Lymington, England. 122 p.
- Smartwood. 2006. *Informe de Evaluación para la Certificación del Manejo Forestal de: Comunidad Santa Catarina Ixtepeji en Oaxaca, Oax. México*. Rainforest Alliance.
- Snider, M. D., and R. F. Miller. 1985. Effects of tractor logging on soils and vegetation in eastern Oregon. *Soil Science Society of America Journal* 49: 1280–1282.
- Solís M., R., O. A. Aguirre C., E. J. Treviño G., J. Jiménez P., E. Jurado Y., y J. Corral, R. 2006. Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de

- ecosistemas forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 12: 49–64.
- Spurr, S. H., and B. V. Barnes. 1980. *Forest ecology*, 3d ed. edition. John Wiley and Sons Inc., New York, NY.
- Staddon, J. W., L. C. Duchesne, and J. T. Trevors. 1999. The role of microbial indicators of soil quality in ecological forest management. *The Forestry Chronicle* 75: 81–86.
- Varza, E. C., S. K. Chong, J. O. Abolaji, D. A. Farquhar and F. J. Olsen. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.), root growth and production. *Soil Tillage Res.* 43: 219-228.
- Vázquez G., A. and T. J. Givnish. 1998. Altitudinal gradients in tropical forest composition structure and diversity in the Sierra de Manantlán *Journal of Ecology* 86:999-1020.
- Vázquez G., I., A. Gómez G., A. Velázquez M., A. Aldrete, y A. Fierros G. 2010 Un penetrómetro dinámico para evaluar la resistencia mecánica en suelos forestales. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 17: 293-302.
- Vázquez C., V. F. 2013. Estructura composición y diversidad arbórea en áreas de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Tesis de licenciatura. UNSIJ. Oaxaca México. 102 p.
- Vidal, P. I. 1994. Dinámica del nitrógeno y biomasa microbiana bajo diferentes manejos de suelo en maíz y trigo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México
- Villaseñor, J. L. 2010. El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad -Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 41 p.
- Villavicencio E., L., y J. I. Valdez H. 2003 Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal rusticano de café en San Miguel, Veracruz, México. *Agrociencia* 37: 413-423.
- Warrick, A. W. 2002. *Soil physics companion*. CRC PRESS. Washington D.C., USA. 389 p.

- Wheater, C. P., and P. A. Cook. 2005. Using statistics to understand the environment. London, UK: Routledge Taylor & Francis. Obtenido de <http://www.eBookstore.tandf.co.uk>.
- Wadsworth, F. H. 2000. Producción Forestal para América Tropical. Departamento de Agricultura de los EE.UU. Servicio Forestal. Manual de Agricultura 710-S Washington, DC. 563 p.
- Whitmore, T. C. 1999. Arguments on the forest frontier. *Biodiversity and Conservation* 8(6):865-868.
- Zacarías E., Y., y R. F. Del Castillo. 2010. Comunidades vegetales templadas de la Sierra Juárez, Oaxaca: pisos altitudinales y sus posibles implicaciones al cambio climático. *Boletín de la sociedad Botánica de México*. Núm. 87:13-28.
- Zarco E., V. M., J. I. Valdez H, G. Ángeles P., y O. Castillo A. 2010. Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del Parque Estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y Ciencia. Trópico Húmedo*. 26:1-17.

ANEXOS

Anexo 1 Principales características de las especies encontradas en Santa Catarina Ixtepeji Oaxaca.

ESPECIE	FAMILIA	F V
Polypodium martensii	Adiantáceas/ teridáceas	Helecho
Eryngium carlinae	Apiaceae	Herbácea
Asplenium resiliens	Aspleniaceae	Helecho o Herbácea
<i>Oreopanax xalapensis (HBK) Dene. & Planch.</i>	<i>Araliaceae</i>	Árbol
<i>Acmella papposa</i>	<i>Asteraceae</i>	Herbácea
Alloispermum integrifolium (DC.) H. Rob	<i>Asteraceae</i>	Herbácea
<i>Argeratina altissima</i>	<i>Asteraceae</i>	Herbácea o arbustos
<i>Argeratina spp</i>	<i>Asteraceae</i>	Arbusto
<i>Baccharis heterophylla Kunth</i>	<i>Asteraceae</i>	Arbusto
<i>Calea ternifolia Kunth var. Ternifolia</i>	<i>Asteraceae</i>	Arbusto
<i>Cirsium ahrenbergii</i>	<i>Asteraceae</i>	Herbácea
<i>Eupatorium collinum</i>	<i>Asteraceae</i>	Herbácea
Senecio oaxacanus Hemls	<i>Asteraceae</i>	Herbácea
Senecio barba- johannis DC	<i>Asteraceae</i>	Herbácea
<i>Alnus acuminata Kunth</i>	<i>Betulaceae</i>	Árbol
Matudanthus nanus	Commelinaceae	Herbácea
Elaphoglossum petiolatum (sw)	Dryopteridaceae	Helecho
<i>Arbutus glandulosa Mart et Gal.</i>	<i>Ericaceae</i>	Árbol o arbusto
Calliandra hirsuta (G. Don.) Benth	Fabaceae	Herbácea
Desmodium conzattii	Fabaceae	Herbácea
Desmodium jaliscanum Watson	Fabaceae	Arbusto herbácea
Lupinus mexicanus	Fabaceae	Herbácea Arbusto
<i>Quercus magnolifolia Née.</i>	<i>Fagáceae</i>	Árbol
<i>Quercus rugosa Née</i>	<i>Fagáceae</i>	Árbol
<i>Quercus laurina Bonpl.</i>	<i>Fagáceae</i>	Árbol
<i>Quercus candicans Née</i>	<i>Fagáceae</i>	Árbol
<i>Quercus acutifolia Humb. & Bonpl.</i>	<i>Fagáceae</i>	Árbol
<i>Quercus castanea Née</i>	<i>Fagáceae</i>	Árbol
Geranium rutundifolium	Geraniaceae	Herbácea

<i>Pteridium aquilinum sub especie capense</i>	<i>hypolepidaceae</i>	Helecho
<i>Tigridia pavonia</i>	<i>Iridaceae</i>	Herbácea
<i>Salvia recurva</i>	<i>Labiatae</i>	Herbácea
<i>Litsea glauscescens kunth</i>	<i>Lauraceae</i>	Arbusto
<i>Persea longipes</i>	<i>Lauraceae</i>	Árbol o arbusto
<i>Schoenocaulon oaxacense</i>	<i>Melanthiaceae</i>	Herbácea
<i>Encyclia rzedowskiana</i>	<i>Orchidaceae</i>	Orquídea
<i>Conopholis alpina mexicana</i>	<i>Oroanchaceae</i>	Herbácea
<i>Pinus leiophylla</i> Schl. & Cham.	<i>Pinaceae</i>	Árbol
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov	<i>Pinaceae</i>	Árbol
<i>Oplismenus hirtellus</i> (L) Beauv	<i>Poaceae = Gramineae</i>	Herbácea
<i>Adiantum capillus veneris</i>	<i>Polipodiaceae</i>	Helecho
<i>Rubus ulmifolius</i>	<i>Rosáceas</i>	Herbácea

Anexo 2 Índice de Valor de Importancia (IVI) para el tratamiento Cortas de Selección 1998 en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

No.	Especies	Densidad		Dominancia		Frecuencia		IVI R
		No. Ind. Ha ⁻¹	%	m ² ha ⁻¹	%	Abs.	%	
1	<i>Pinus oaxacana</i>	285	41.56	1.66	82.02	13	17.57	47.05
2	<i>Quercus rugosa</i>	112	16.36	0.18	8.93	13	17.57	14.29
3	<i>Quercus magnifolia</i>	126	18.44	0.10	5.03	12	16.22	13.23
4	<i>Persea longipes</i>	80	11.69	0.02	1.00	9	12.16	8.28
5	<i>Arbutus xalapensis</i>	23	3.38	0.02	0.92	9	12.16	5.49
6	<i>Quercus candicans</i>	26	3.90	0.02	0.99	8	10.81	5.23
7	<i>Pinus leiophylla</i>	14	2.08	0.02	0.79	5	6.76	3.21
8	<i>Quercus laurina</i>	10	1.56	0.00	0.20	3	4.05	1.94
9	<i>Quercus acutifolia</i>	7	1.04	0.00	0.13	2	2.70	1.29
		687	100.0	2.03	100.0	74	100.0	100.0

Anexo 3 Índice de valor de importancia (IVI) para el tratamiento cortas de regeneración por árboles padre 2011 en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

No.	Especies	Densidad		Dominancia		Frecuencia		IVI R
		No. Ind. Ha ⁻¹	%	m ² ha ⁻¹	%	Abs.	%	
1	<i>Pinus oaxacana</i>	710	64.84	41.00	82.71	20	23.26	56.93
2	<i>Quercus rugosa</i>	140	12.79	5.11	10.30	17	19.77	14.29
3	<i>Quercus magnifolia</i>	165	15.07	2.70	5.44	19	22.09	14.20
4	<i>Pinus leiophylla</i>	22	2.05	0.30	0.61	9	10.47	4.38
5	<i>Arbutus xalapensis</i>	15	1.37	0.10	0.21	8	9.30	3.63
6	<i>Persea longipes</i>	25	2.28	0.12	0.24	6	6.98	3.17
7	<i>Quercus candicans</i>	8.75	0.80	0.12	0.25	5	5.81	2.29
8	<i>Quercus acutifolia</i>	8.75	0.80	0.12	0.24	2	2.33	1.12
		1095	100	49.57	100	86	100	100

Anexo 4 Índice de valor de importancia (IVI) para el tratamiento aclareo ligero 2011 en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

No.	Especies	Densidad		Dominancia		Frecuencia		IVI R
		No. Ind. Ha ⁻¹	%	m ² ha ⁻¹	%	Abs.	%	
1	<i>Pinus oaxacana</i>	1033	74.91	21.21	82.49	20	19.42	58.94
2	<i>Quercus rugosa</i>	122	8.88	1.43	5.56	19	18.45	10.96
3	<i>Quercus magnifolia</i>	111	8.06	1.38	5.37	19	18.45	10.63
4	<i>Pinus leiophylla</i>	43	3.17	1.28	4.96	15	14.56	7.57
5	<i>Arbutus xalapensis</i>	23	1.72	0.12	0.45	19	18.45	6.87
6	<i>Persea longipes</i>	37	2.72	0.19	0.73	7	6.80	3.42
7	<i>Quercus laurina</i>	3	0.27	0.10	0.39	2	1.94	0.87
8	<i>Quercus candicans</i>	3	0.27	0.01	0.04	2	1.94	0.75
		1380	100	25.71	100	103	100	100

Anexo 5 Índice de valor de importancia (IVI) para el tratamiento cortas de regeneración por árboles padre 1998 en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca.

No.	Especies	Densidad		Dominancia		Frecuencia		IVI R
		No. Ind. Ha ⁻¹	%	m ² ha ⁻¹	%	Abs.	%	
1	<i>Pinus oaxacana</i>	386	25.95	25.32	73.84	15.00	14.85	38.22
2	<i>Quercus magnifolia</i>	323	21.70	3.83	11.17	15.00	14.85	15.91
3	<i>Quercus rugosa</i>	248	16.67	2.42	7.04	14.00	13.86	12.52
4	<i>Persea longipes</i>	338	22.71	0.68	1.99	12.00	11.88	12.19
5	<i>Quercus candicans</i>	90	6.04	0.70	2.05	11.00	10.89	6.33
6	<i>Quercus laurina</i>	22	1.45	0.21	0.60	13.00	12.87	4.98
7	<i>Arbutus xalapensis</i>	41	2.80	0.39	1.14	11.00	10.89	4.94
8	<i>Quercus acutifolia</i>	28	1.90	0.24	0.70	6.00	5.94	2.85
9	<i>Pinus leiophylla</i>	6.67	0.45	0.48	1.39	2.00	1.98	1.27
10	<i>Litsea glaucescens</i>	3	0.22	0.01	0.02	1.00	0.99	0.41
11	<i>Alnus acuminata</i>	2	0.11	0.02	0.04	1.00	0.99	0.38
		1490	100	34.29	100	101	100	100

Anexo 6 Índice de valor de importancia (IVI) para el bosque no manejado en Santa Catarina Ixtepeji Oaxaca.

No.	Especies	Densidad		Dominancia		Frecuencia		IVI R
		No. Ind. Ha ⁻¹	%	m ² ha ⁻¹	%	Abs.	%	
1	<i>Pinus oaxacana</i>	233	36.60	12.46	53.86	6	13.95	34.81
2	<i>Persea longipes</i>	125	19.61	0.37	1.60	6	13.95	11.72
3	<i>Quercus magnolifolia</i>	42	6.54	3.29	14.22	4	9.30	10.02
4	<i>Litsea glaucescens</i>	50	7.84	1.38	5.94	6	13.95	9.25
5	<i>Quercus rugosa</i>	58	9.15	1.59	6.88	5	11.63	9.22
6	<i>Quercus castanea</i>	29	4.58	2.80	12.09	4	9.30	8.66
7	<i>Oreopanax xalapensis</i>	50	7.84	1.06	4.58	4	9.30	7.24
8	<i>Arbutus glandulosa</i>	38	5.88	0.14	0.62	5	11.63	6.04
9	<i>Quercus laurina</i>	8	1.31	0.04	0.18	2	4.65	2.05
10	<i>Alnus acuminata</i>	4	0.65	0.00	0.01	1	2.33	1.00
		637.5	100	23.14	100	43	100	100