

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE BOSQUES DE PINO-
ENCINO BAJO MANEJO EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA,
MÉXICO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales

Presenta

Juan Francisco Castellanos Bolaños

Linares, Nuevo León, México. Julio de 2008

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE BOSQUES DE PINO-
ENCINO BAJO MANEJO EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA,
MÉXICO

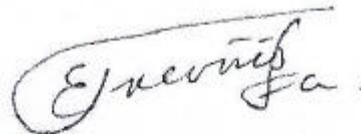
TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales

Presenta

Juan Francisco Castellanos Bolaños

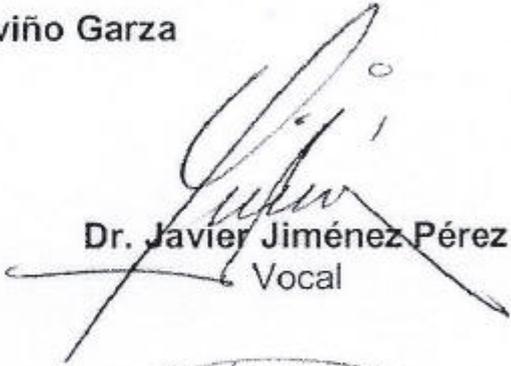
Comité de Tesis:



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza
Director



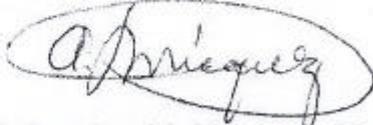
Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón
Secretario



Dr. Javier Jiménez Pérez
Vocal



Dr. Ricardo López Aguillón
Vocal



Dr. Alejandro Velázquez Martínez
Vocal

Linares, Nuevo León, México. Julio de 2008

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

A la Universidad Autónoma de Nuevo León - Facultad de Ciencias Forestales.

A la Comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Méx.

A las personas integrantes de mi Comité de Tesis, Dr. Eduardo Javier Treviño Garza, Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, Dr. Javier Jiménez Pérez, Dr. Ricardo López Aguillón y Dr. Alejandro Velázquez Martínez.

DEDICATORIA

A mi esposa Ana María Ramos García

A mis hijos Citlalli, Ana Karen y Juan José.

INDICE

Contenido	Página
PRESENTACIÓN	1
CAPITULO I. RESEÑA DEL MANEJO FORESTAL Y DE LA DIVERSIDAD VEGETAL EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO	3
I.1. ANTECEDENTES DEL MANEJO FORESTAL	3
I.2. LA DIVERSIDAD VEGETAL	7
I.3. REFERENCIAS	11
CAPÍTULO II. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA ESPACIAL DE BOSQUES DE PINO-ENCINO BAJO MANEJO EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO	14
II.1. RESUMEN	14
II.2. ABSTRACT	15
II.3. INTRODUCCIÓN	16
II.4. HIPÓTESIS	17
II.5. OBJETIVO	17
II.6. ANTECEDENTES	17
II.7. MATERIALES Y MÉTODOS	20
II.7.1. Área de estudio	20
II.7.2. Diversidad de especies arbóreas	20
II.7.3. Composición de la estructura	22
II.7.4. Análisis estadístico	28
II.8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
II.8.1. Diversidad de especies arbóreas	30
II.8.2. Composición de la estructura	39
II.9. CONCLUSIONES	51
II.10. REFERENCIAS	53
CAPÍTULO III. ESTRUCTURA DE BOSQUES DE PINO PÁTULA BAJO MANEJO EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO	57
III.1. RESUMEN	57
III.2. ABSTRACT	63
III.3. INTRODUCCIÓN	59
III.4. HIPÓTESIS	60
III.5. OBJETIVO	60
III.6. MATERIALES Y MÉTODOS	61
III.6.1. Área de estudio	61
III.6.2. Diversidad de especies arbóreas	61
III.6.3. Composición de la estructura	62
III.6.4. Análisis estadístico	64

Contenido	Página
III.7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
III.7.1. Diversidad de especies arbóreas	65
III.7.2. Composición de la estructura	68
III.8. CONCLUSIONES	73
III.9. REFERENCIAS	74
CAPÍTULO IV. MODELOS DE CRECIMIENTO EN ALTURA PARA PINO PÁTULA EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO	77
IV.1. RESUMEN	77
IV.2. ABSTRACT	78
IV.3. INTRODUCCIÓN	79
IV.4. HIPÓTESIS	80
IV.5. OBJETIVO	80
IV.6. ANTECEDENTES	81
IV.7. MATERIALES Y MÉTODOS	85
IV.7.1. Área de estudio	85
IV.7.2. Base de datos	85
IV.7.3. Modelos de crecimiento en altura dominante	87
IV.8. RESULTADOS	91
IV.8. 1. Selección de modelos sin considerar el tipo de suelo	91
IV.8. 2. Selección de modelos para suelos delgados	93
IV.8. 3. Selección de modelos para suelos profundos	95
IV.9. CONCLUSIONES	98
IV.10. REFERENCIAS	99
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES	102
ANEXO 1.	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
II.1.	Grupo estructural y ejemplo del cálculo de los índices, Mezcla de especies (M_i), Uniformidad de Ángulos (W_i) y Dominancia (U_i).	27
II.2.	Distribución del Índice Mezcla de Gadow para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de <i>Pinus</i> dominante asociada.	41
II.3.	Distribución del Índice Uniformidad de Ángulos para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de <i>Pinus</i> dominante asociada.	43
II.4.	Distribución del Índice de Dominancia para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de <i>Pinus</i> dominante asociada.	45
II.5.	Distribución del Índice de Diferenciación Diamétrica para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de <i>Pinus</i> dominante asociada.	47
II.6.	Distribución del Índice de Diferenciación en Altura para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de <i>Pinus</i> dominante asociada.	50
III.1.	Distribución de categorías diamétricas de pino pátula por condición.	67
III.2.	Distribución del Índice Mezcla de Especies por condición silvícola.	69
III.3.	Distribución del Índice de Uniformidad de Ángulos (W_i) por condición silvícola.	71
III.4.	Distribución del Índice de Dominancia de pino pátula por condición silvícola.	72
IV.1.	Datos de altura-edad para el total de árboles; b, datos de altura edad para árboles ubicados en suelos delgados; c, datos de altura-edad para árboles ubicados en suelos profundos.	86
IV.2.	Curvas polimórficas de índice de sitio con una edad de referencia de 50 años para el total de datos a través del modelo de Chapman-Richards.	93
IV.3.	Curvas polimórficas de índice de sitio con una edad de referencia de 50 años para suelos delgados a través del modelo de Chapman-Richards.	95
IV.4.	Curvas polimórficas de índice de sitio con una edad de referencia de 50 años para suelos profundos a través del modelo de Chapman-Richards.	97

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
II.1.	Especies presentes y valor de importancia (VI en %) en cada una de las ocho comunidades fitosociológicas.	32
II.2.	Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad pátula.	34
II.3.	Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad oaxacana.	35
II.4.	Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad pseudostrobus.	35
II.5.	Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad duglasiana.	36
II.6.	Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad ayacahuite.	36
II.7.	Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad teocote.	37
II.8.	Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad rudis.	37
II.9.	Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad leiofila.	37
II.10.	Valores de número de especies, Índice de Shannon (H'), prueba de Kolmogorob-Smirnov, rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis y prueba de Nemenyi para H' en ocho comunidades fitosociológicas.	38
II.11.	Valores promedio para los índices, Mezcla de Gadow (Mi), Uniformidad de Ángulos (Wi), Dominancia (Ui) y rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis (KW) y comparación con la prueba de Nemenyi.	40
II.12.	Valores promedio de diámetros, coeficientes de variación (CV) e índices de diferenciación diamétrica (Ti).	46
II.13.	Cuadro II.13. Valores promedio de altura, coeficientes de variación (CV) e índices de diferenciación en altura (Thi).	48
III.1.	Fórmulas de los índices de diversidad y estructurales utilizadas.	63
III.2.	Valor de importancia (VI), número de árboles (NA), área basal (AB), altura (A) y diámetro ($d_{1.3 m}$) para las especies comunes en cada condición silvícola.	66
III.3.	Valores promedio del Índice Shannon (H'), rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis (KW) y comparación múltiple con la prueba de Nemenyi por condición silvícola.	68

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
III.4.	Valores promedio para los índices, Mezcla de Gadow (Mi), Uniformidad de Ángulos (Wi), Dominancia (Ui) y rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis (KW) y comparación múltiple con la prueba de Nemenyi por condición silvícola.	69
IV.1.	Ecuaciones dinámicas utilizadas para predecir altura dominante.	88
IV.2.	Modelos bajo la formulación de efectos mixtos.	89
IV.3.	Bondad de ajuste de los modelos de efectos mixtos a los datos de edad-altura para el total de árboles.	91
IV.4.	Valores de los parámetros estimados para los efectos fijos e intervalos de confianza al 95% para los efectos aleatorios, de modelos bajo prueba para el total de árboles.	92
IV.5.	Bondad de ajuste de los modelos de efectos mixtos a los datos de edad-altura de árboles ubicados en suelos delgados.	93
IV.6.	Valores de los parámetros estimados para los efectos fijos e intervalos de confianza al 95% para los efectos aleatorios de modelos bajo prueba, en la condición de suelos delgados.	94
IV.7.	Bondad de ajuste de los modelos de efectos mixtos a los datos de edad-altura de árboles ubicados en suelos profundos.	95
IV.8.	Valores de los parámetros estimados para los efectos fijos e intervalos de confianza al 95% para los efectos aleatorios de modelos bajo prueba, en la condición de suelos profundos.	96
IV.9.	Índice de sitio a una edad de referencia de 50 años para las tres condiciones de suelo a través del modelo de Chapman-Richards polimórfico.	98

ÍNDICE DE CUADROS DEL ANEXO I

Cuadro		Página
A1.	Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad pátula.	104
A2.	Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad oaxacana.	105
A3.	Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad pseudostrobus.	105
A4.	Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad duglasiana.	106
A5.	Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad ayacahuite.	106
A6.	Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad teocote.	107
A7.	Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad rudis.	107
A8.	Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad leiofila.	107

PRESENTACIÓN

En los últimos años a crecido el interés de la sociedad por conocer mejor la condición en la que se encuentran los bosques y en participar activamente en proponer alternativas de mejora. Lo anterior ha llevado a los consumidores a exigir que sus adquisiciones de madera y otros productos forestales no contribuyan a aumentar esta destrucción, sino que más bien ayuden a conservar los recursos forestales para el futuro.

Por normatividad, para solicitar autorización de aprovechamientos maderables, es indispensable presentar información a través de estudios técnicos que soporten la práctica del corte de árboles. Como complemento a la normatividad durante los últimos 10 años, en algunas comunidades de México, se ha desarrollado un proceso de certificación forestal.

La certificación es una herramienta que sirve para verificar formal y voluntariamente que el manejo forestal cumple con cierto estándar y de forma paralela se convierte en un instrumento económico que tiene como objetivo el acceso a un mercado con mejores precios de la madera que permitirá cubrir los costos del buen manejo del bosque.

En este marco del desarrollo sustentable y en relación a los bosques, se ha desarrollado una filosofía denominada “Manejo Forestal Sustentable” que significa describir un manejo forestal que asegure la salud y productividad del bosque a largo plazo y que a la vez proporcione un flujo continuo de beneficios ecológicos, sociales y económicos principalmente para las comunidades locales.

Es en este marco de referencia en el que se considera la presente tesis, la cual aborda en primer lugar, una reseña del manejo forestal en el área de estudio, desde la época de las concesiones estatales hasta la actualidad, se destacan los aspectos sociales, económicos y ecológicos. Se complementa este capítulo con información de la diversidad vegetal en el estado de Oaxaca y en particular en Ixtlán de Juárez, invitando al lector interesado en consultar las fuentes bibliográficas anotadas.

En segundo término se presentan los resultados de un análisis comparativo sobre la diversidad de especies de árboles y de la estructura espacial entre ocho comunidades vegetales con dominancia de pino-encino, que han estado bajo manejo forestal.

El tercer capítulo atiende un análisis intra-estructural de rodales de pino pátula bajo manejo en atención a ser el tipo de bosque con mayor importancia económica, también con la finalidad de mostrar dos aspectos centrales, la diversidad de especies de árboles y la estructura espacial de acuerdo con la etapa de desarrollo de los rodales.

En la cuarta parte se presenta información acerca de la evaluación de algunos modelos dinámicos de crecimiento en altura dominante compatibles con modelos de índice de sitio para pino pátula, aspectos que finalmente están vinculados con la productividad de las áreas donde crecen los árboles.

Al final se rescatan las conclusiones generales con la esperanza que los elementos técnico-científicos resultado de la presente investigación se incorporen al programa de manejo forestal de la Comunidad de Ixtlán de Juárez y que puedan contribuir a fundamentar las prácticas de buen manejo.

CAPÍTULO I

RESEÑA DEL MANEJO FORESTAL Y DE LA DIVERSIDAD VEGETAL EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO

I.1. ANTECEDENTES DEL MANEJO FORESTAL

La comunidad de Ixtlán de Juárez se localiza en la región denominada Sierra de Juárez o también conocida como Sierra Norte en el estado de Oaxaca, México. Su acceso es a través de la carretera federal número 175 Oaxaca-Tuxtepec, a una distancia de 61 km al norte de la ciudad de Oaxaca.

El predio de Ixtlán de Juárez es de propiedad comunal, donde residen 2370 habitantes, de los cuales 420 son comuneros, lo que implica estar inscrito y reconocido ante el Comisariado de Bienes Comunales. La principal actividad económica generadora de empleos es el aprovechamiento forestal maderable y su proceso de transformación que genera aproximadamente 200 empleos directos.

La comunidad de Ixtlán de Juárez abarca un área total de 19492 ha, de las cuales 11896 ha son clasificadas como forestales de clima templado-fría y de éstas se tienen inventariadas 8835 ha de bosques comerciales de pino-encino, la mayor parte se conforman de rodales incoetáneos de segundo crecimiento que han estado bajo aprovechamiento maderable a través de cortas selectivas y/o aclareos con el objetivo de producir madera aserrada y celulosa.

Las especies de pinos de mayor distribución e importancia económica son: *Pinus patula* Schl et Cham la cual se distribuye en 5000 ha; *Pinus oaxacana* Mirov en 2000 ha; *Pinus teocote* Schl et Cham en 800 ha; *Pinus douglasiana* Mtz en 450 ha; *Pinus pseudostrobus* Lindley en 340 ha; *Pinus rudis* Ende en 280 ha; *Pinus ayacahuite* Ehrenberg en 200 ha; *Pinus leiophylla* Schl et Cham en 100 ha; generalmente los rodales son mezclados aunque las especies mencionadas son dominantes.

En Ixtlán de Juárez, los aprovechamientos maderables a nivel comercial, se han efectuado desde hace aproximadamente 52 años; se pueden clasificar en dos etapas, la etapa de las concesiones forestales estatales y la etapa comunal.

Etapas de las concesiones estatales (1956-1981)

En los registros históricos relacionados con los aprovechamientos maderables se menciona que, a partir de 1949 por decreto presidencial se declaró como zonas protectoras forestales y de repoblación las cuencas de los distritos de riego y se estableció una veda total e indefinida en los montes ubicados dentro de dichas cuencas (D.O.F. 03 ago 1949), entre ellas la Cuenca del Río Papaloapan, que abarca prácticamente el tercio norte del estado de Oaxaca, incluido el territorio de Ixtlán de Juárez.

En 1954 se creó la empresa Fábricas de Papel Tuxtepec y en el año 1956 se le concesionó el aprovechamiento de los bosques del norte del estado de Oaxaca, sobre una superficie aproximada de 250,000 ha, a través de la Unidad Industrial de Explotación Forestal Fábricas de Papel Tuxtepec S. A., por un período de 25 años (D.O.F. 14 nov. 1956), suspendiéndose la veda exclusivamente sobre la superficie concesionada.

En el periodo de concesión a la UIEF Fapatux, el soporte técnico justificativo para el aprovechamiento maderable fueron principalmente 2 documentos base; el primero de ellos fue el “Estudio dasonómico de la Unidad Industrial de Explotación Forestal Fábricas de Papel Tuxtepec” autorizado en 1962 (con modificaciones en 1963) con una vigencia de 15 años (UIEF Fapatux, S.A. 1977).

El segundo documento fue el “Estudio Forestal Fotogramétrico, Sección I, III y IV. Estado de Oaxaca” que la UIEF Fapatux presentó en 1977 ante la Subsecretaría Forestal por una vigencia de 17 anualidades, es decir hasta el año 1993, aunque dicha empresa efectuó el aprovechamiento maderable hasta 1981, año en que finalizó la concesión.

En 1982 se tuvo la intención de renovar la concesión, se llegó a publicar el decreto renovando la concesión a Fapatux (D.O.F. 26 de noviembre 1982), pero las organizaciones sociales tuvieron la capacidad para interponer un recurso de amparo contra el decreto.

Este período se caracterizó, en el aspecto técnico, por la aplicación del método de selección en el corte de árboles, estudios y registros en mínima cantidad y muy generales, con actividades de seguimiento y monitoreo prácticamente nulos.

En el aspecto social, la participación fue nula, sin consulta ni opinión del sector social. Se desarrollaron una serie de movilizaciones sociales, primero, por demandas de mejoras laborales y posteriormente complementadas con la demanda de apropiación y conservación de los recursos naturales (Bray, 1991; Chapela, 1999).

En el aspecto económico los beneficios para la comunidad fueron limitados, estos se recibían a través del pago de “derecho de monte” que era fijado por la Secretaría de la Reforma Agraria y el pago de mano de obra no calificada, principalmente como jornaleros (Merino, 2001)

Etapas comunales (1981-2008)

Se ha desarrollado durante los últimos 27 años (1981-2008). Este período es distintivo por, la organización comunal con la finalidad de apropiarse de los aprovechamientos maderables; la participación de los comuneros en la toma de decisiones y beneficiarios directos; ser la comunidad indígena pionera en el establecimiento de empresas sociales forestales, el inicio del desarrollo de estudios y programas de manejo forestal sistematizados con el aval de instituciones gubernamentales y certificados por organismos no gubernamentales.

A partir de 1981 Ixtlán de Juárez y otras comunidades aledañas, se responsabilizaron del aprovechamiento maderable, continuando con el “Estudio Forestal Fotogramétrico” presentado por la UIEF Fapatux S.A., es decir hasta el año 1993.

A partir de 1994 la comunidad de Ixtlán de Juárez, fundamentó su aprovechamiento maderable a través del Programa de Manejo Forestal, el cual tuvo una vigencia de 10 años, es decir hasta el año 2003 (Técnica Informática Aplicada. S.A. 1993). Este Programa se caracterizó por sus esfuerzos en segregar importantes áreas de preservación y por hacer esfuerzos en la transformación de la madera para darle mayor valor agregado.

Debido al correcto manejo de sus bosques, Ixtlán de Juárez recibió el Premio Nacional al Mérito Forestal del año 2000 (CONAFOR, 2007), además cuenta con la certificación de buen manejo forestal desde el año 2001 (SmartWood, 2001) y en el año 2002 el Fondo Mundial para la Naturaleza le otorgó, junto con otras 7 comunidades de la región, el “Regalo para la Tierra”, que es el máximo reconocimiento a nivel mundial que brinda esta organización por el trabajo de conservación (WWF, 2007).

Los principales objetivos del manejo forestal son: Producción de madera en trozas de suficiente regularidad y calidad. Creación de empleo para la población local. Conservación de los valores naturales y de la viabilidad ecológica de la producción en las áreas forestales.

I.2. LA DIVERSIDAD VEGETAL

México es uno de los cinco países megadiversos del mundo, se le considera el quinto por su riqueza vegetal después de Brasil, Colombia, China y Sudáfrica (Villaseñor, 2003). En la República mexicana, la mayor diversidad se encuentra a lo largo de un área que se inicia en Chiapas, incluye Oaxaca y se prolonga por un lado hacia el centro de Veracruz y por el otro a Guerrero (Rzedowski, 1998). De ahí la importancia de la flora de Oaxaca, ya que es uno de los estados con mayor riqueza florística de México (García, 2004).

Los tipos de vegetación en Oaxaca contienen una importante diversidad biológica representada en diferentes asociaciones de plantas, en el estudio más reciente, Torres (2004), toma como base las clasificaciones de Miranda y Hernández X (1963) y la de Rzedowski (1978) para proponer y describir 26 tipos de vegetación para el estado de Oaxaca, agrupados bajo un criterio fisonómico-florístico, ellos son: bosque de abetos u oyameles; bosque de enebros; bosque caducifolio; bosque mesófilo de montaña; encinares; pinares; cardonales y tetecheras; chaparral; matorral espinoso; izotal; selva alta perennifolia; selva alta o mediana subcaducifolia; selva alta o mediana subperennifolia; selva baja caducifolia; selva baja espinosa caducifolia; selva mediana caducifolia; manglar; popal; tular y carrizal; vegetación flotante y sumergida; bosque de galería; palmar; pastizal; sabana; vegetación de dunas costeras; agrupaciones de halófitos.

Oaxaca es uno de los estados de México más ricos en plantas vasculares, se reportan 251 familias, 1824 géneros, 8431 especies; las cifras más elevadas corresponden a las angiospermas con 217 familias, 1700 géneros y 7752 especies (García-Mendoza 2004). La suma de las angiospermas constituyen 87.5% de las 248 familias de México; los 1700 géneros representan 63.9% de los 2657 del país, y las 7752 especies representan el

34.6% de las 22351 de México, citadas por Villaseñor (2003), basado en el mismo sistema de clasificación.

Las pteridofitas en Oaxaca están representadas por 28 familias, 112 géneros y 627 especies, solo hace falta una familia de todas aquellas presentes en toda la república mexicana, con ello Oaxaca es el estado con mayor riqueza específica de helechos y plantas afines del país; las especies de pteridofitas representan 7.4% del total de flora vascular del estado (García-Mendoza, 2004).

México registra seis de las 16 familias de gimnospermas que existen en el mundo (Medina y Dávila, 1997), con aproximadamente 160 especies (Sosa y Dávila, 1994). En Oaxaca están presentes las seis familias (Cupressaceae, Ephedraceae, Pinaceae, Podocarpaceae, Taxaceae, Zamiaceae), 12 géneros y 52 especies (32.5% del total de México). La familia Pinaceae es la más importante por la cobertura que tienen sus especies en el dosel arbóreo de bosques templados. La mayor riqueza corresponde al género *Pinus*. México tiene la mayor diversidad de pinos en el mundo (Styles, 1998), con 42 especies más 18 taxones infraespecíficos (Farjon y Styles, 1997); de ese total 17 especies (40.4%) se encuentran en Oaxaca (Del Castillo *et al.*, 2004). Eguiluz (1985) considera la Sierra Madre del Sur y el Macizo del Norte de Oaxaca como uno de los seis centros de diversidad de pinos en México, aunque muchas de estas especies son de amplia distribución y no presentan endemismos estatales.

Los géneros endémicos de Oaxaca detectados hasta el momento son nueve, todos ellos monoespecíficos, *Ainea konzattii* (R.C. Foster) Rabean (Iridaceae) especie del bosque de *Pinus-Quercus*; *Fosteria oaxacana* Molseed (Iridaceae), planta del bosque de *Quercus-Pinus*; *Guinetia tehuantepecensis* L. Rico *et* M. Sousa (Leguminisae), arbusto de la franja costera del Istmo de Tehuantepec; *Habroneuron radicans* (Wernham) S. Darwin (Rubiaceae), arbusto trepador que crece sobre las rocas a la orilla de ríos; *Matudanthus*

nanus (M. Martens et Galeotti) D.R. Hunt (Commelinaceae) especie del bosque de *Quercus-Pinus* y mesófilo de montaña; *Mexipedium xerophyticum* (Soto Arenas, Salazar et Hagsater) V.A. Albert et M.W. Chase (Orchidaceae), género de una zona cárstica rodeada de selva alta perennifolia y encinar tropical; *Ortegocactus macdougallii* Alexander (Cactaceae) planta de vegetación xerófila; *Pseudocranichis thysanochila* (Rob. et Greenm) Garay (Orchidaceae), especie del bosque de *Quercus-Pinus*; *Tehuana calzadae* Panero et Villaseñor (Asteraceae) hierba anual endémica de la vegetación secundaria de la selva baja caducifolia (García-Mendoza, 2004).

En el nivel específico, en Oaxaca se presentan 702 especies endémicas de plantas vasculares, representan 21% de las 3334 especies endémicas de plantas vasculares de México (García-Mendoza, 2004).

En la obra biodiversidad de Oaxaca (García et al., 2004) se da a conocer por primera vez el número total de especies para Oaxaca de las siguientes familias: Agavaceae, Alismataceae, Apocynaceae, Asteraceae, Cactaceae, Cupressaceae, Crassulaceae, Euphorbiaceae, Fagaceae, Leguminosae, Lemnaceae, Limnocharitaceae, Menyanthaceae, Pinaceae, Podocarpaceae, Podostemaceae, Pontederiaceae, Potamogetonaceae, Ruppiaceae, Solanaceae, Taxaceae, Typhaceae y Zannichelliaceae.

Algunas áreas son importantes por su riqueza florística, la Sierra Juárez o Sierra Norte de Oaxaca es un ejemplo de ello, representa también el límite septentrional de distribución de muchos taxones mesoamericanos de montaña y es una región de importancia para las Pteridofitas y géneros como *Begonia*, *Quercus*, *Miconia* y *Piper*, Dávila et al. (1997) calculan 2000 las especies presentes en esta Sierra, con un alto endemismo.

En la Sierra Norte de Oaxaca el género *Pinus* está representado 13 especies: *P. ayacahuite*; *P. chiapensis*; *P. devoniana* (= *P. michoacana*); *P. douglasiana*; *P. hartwegii*; *P. lawsonii*; *P. leiophylla*; *P. maximinoi*; *P. montezumae*; *P. oocarpa*; *P. patula* (con 2

variedades *patula* y *longepedunculata*); *P. pseudostrobus* (con 2 variedades *pseudostrobus* y *apulcensis* la cual es considerada sinónimo de *P. oaxacana* Mirov) y *P. teocote* (Del Castillo *et al.*, 2004).

En Oaxaca *Quercus* tiene 52 especies, 24 de la sección *Quercus* (encinos blancos) y 28 de la sección *Lobatae* (encinos rojos); estas cifras ubican al estado en el tercer lugar en diversidad de encinos, después de Nuevo León y Veracruz. En el estado de Oaxaca, el Distrito con mayor riqueza es Ixtlán de Juárez con 23 especies, distribuidos en el bosque de pino (BP), bosque de pino-encino (BPQ), bosque de encino (BQ), bosque mesófilo de montaña (BMM), selva baja caducifolia (SBC). Encinos blancos: *Quercus corrugata* Hook en BMM; *Q. glabrescens* Benth en BMM, BQ; *Q. glaucoides* M. Martens *et* Galeotti en BPQ, BQ, SBC; *Q. liebmanni* Oerst en BPQ; *Q. macdougallii* Martínez en BMM, BQ; *Q. peduncularis* Neé en BPQ, BQ; *Q. polymorpha* Cham *et* Schltr en BQ, SBC; *Q. rugosa* Neé en BMM, BPQ, BQ; *Q. sp nov* en BPQ, BQ. Encinos rojos: *Q. aff eugeniifolia* Liebm en BMM; *Q. affinis* Schidw en BQ; *Q. candicans* Neé en BMM, BPQ; *Q. castanea* Neé en BMM, BPQ, BQ; *Q. conspersa* Benth en BP, BPQ, BQ; *Q. konzattii* Trel en BQ; *Q. crassifolia* Humb *et* Bonpl en BMM, BP, BPQ, BQ; *Q. depressa* Humb *et* Bonpl en BPQ; *Q. laurina* Humb *et* Bonpl en BPQ, BQ; *Q. ocoteifolia* Liebm en BMM, BQ; *Q. pinnativenulosa* C.H. Mull en BMM, BQ; *Q. sartorii* Liebm en BMM; *Q. scytophylla* Liebm en BMM, BPQ (Valencia y Nixon, 2004).

I.3. REFERENCIAS

- Bray, D. B. 1991. La lucha por el bosque; conservación y desarrollo en la Sierra Juárez. Fundación Interamericana Desarrollo de Base. Washington D.C. 15(3)
- Chapela, F. 1999. Emergencia de las organizaciones sociales de Oaxaca: la lucha por los recursos forestales. *Alteridades* 9(17):105-112.
- Comisión Nacional Forestal. 2007. Cultura Forestal: Premio Nacional al Mérito Forestal. Relación de galardonados 1979-2000. En: [www:conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)
- Dávila, P., L. Torres, R. Torres y O. Herrera. 1997. Sierra de Juárez, Oaxaca, México. In: V. H. Heywood y S. D. Davis (Coords). *Centres of plant diversity, A Guide and Strategy for their Conservation*. WWF-UICN. pp 135-138.
- Del Castillo, R.F., J.A. Pérez de la Rosa, G. Vargas Amado y R. Rivera García. 2004. Coníferas. En: García -Mendoza, A. J., M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas (Eds.). *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, México, pp 141-158.
- Diario Oficial de la Federación. México. 03 agosto 1949. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Decreto que declara zonas protectoras forestales y de repoblación las cuencas de alimentación de las obras de irrigación de los Distritos Nacionales de Riego, y se establece una veda total e indefinida en los montes ubicados dentro de dichas cuencas.
- Diario Oficial de la Federación. México. 26 de noviembre 1982. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Decreto por el que por causa de interés público y para el adecuado manejo del bosque se establece una unidad de ordenación forestal y se reconoce como área productora forestal, la región que incluye los terrenos forestales que se comprenden en las comunidades de Oaxaca.

- Diario Oficial de la Federación. México. 14 noviembre de 1956. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Decreto que declara de utilidad pública la constitución de una unidad industrial de explotación forestal a favor de la empresa denominada Fábricas de Papel Tuxtepec. S.A de C.V.
- Eguiluz P., T. 1985. Origen y evolución del género *Pinus* (con referencia especial a los pinos mexicanos). *Dasonomía Mexicana* 3(6):5-31.
- Farjon, A. and B. T. Styles. 1997. *Flora Neotropica Monograph 75. Pinus (Pinaceae)*. The New York Botanical Garden, New York. 291 p.
- García-Mendoza, A. J. 2004. Integración del conocimiento florístico del estado. En: García-Mendoza, A.J., M.J. Ordóñez y M. Briones-Salas (Eds.). *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, México, pp 141-158.
- García-Mendoza, A., M. Ordóñez y M. Briones-Salas. (Eds). 2004. *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, México D.F. 605 pp.
- Medina L., R. y P. Dávila. 1997. *Flora del Valle de Tehuacan-Cuicatlán. Fascículo 12. Gymnospermae Lindl.* Instituto de Biología, UNAM. México. 27 p.
- Merino P., L. 2001. Las políticas forestales y de conservación y sus impactos sobre las comunidades forestales. *Estudios Agrarios* 18: 75-115
- Miranda, F. y E. Hernández X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 28:29-179.
- Rzedowsky, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México. 432 p.
- Rzedowsky, J. 1998. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. En: T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds). *Diversidad biológica de México: orígenes y distribución*. Instituto de Biología, UNAM. México. pp.129-145.

- SmartWood. 2004. Resumen Público de Certificación de la Comunidad de Ixtlán de Juárez. 46 p.
- Sosa, V. y P. Dávila. 1994. Una evaluación del conocimiento florístico de México. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 81:749-757.
- Styles, B.T. 1998. El género *Pinus*: su panorama en México. En: T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds). *Diversidad biológica de México: orígenes y distribución*. Instituto de Biología, UNAM. México. pp. 385-408.
- Técnica Informática Aplicada. S.A. 1993. Programa de Manejo Integral Forestal de Ixtlán de Juárez 1993-2002. 290 p.
- Torres-Colín, R. 2004. Tipos de vegetación. En: García-Mendoza, A.J., M.J. Ordóñez y M. Briones-Salas (Eds.), *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, México, pp 105-117.
- Unidad Industrial de Explotación Forestal Fábricas de Papel Tuxtepec, S.A. 1977. Proyecto General de Ordenación. Estudio Forestal Fotogramétrico, Sección I, III y IV. Estado de Oaxaca. 167 p.
- Valencia Ávalos, S., y K. C. Nixon. 2004. Encinos. En: García-Mendoza, A.J., M.J. Ordóñez y M. Briones-Salas (Eds.). *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología-UNAM, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund, México, pp 219-225.
- Villaseñor, J. L. 2003. Diversidad y distribución de las Magnoliophyta de México. *Interciencia* 28(3):160-167.
- World Wildlife Fund. 2007. Comunidades indígenas. Sierra Norte. En: www.wwf.org.mx.

CAPÍTULO II

COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA ESPACIAL DE BOSQUES DE PINO-ENCINO BAJO MANEJO EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO

II.1. RESUMEN

Se presenta un análisis comparativo de la diversidad de especies arbóreas y de la estructura espacial en rodales naturales de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. Se definieron ocho comunidades fitosociológicas denominadas: pátula, oaxacana, pseudostrobus, duglasiana, ayacahuite, teocote, rudis y leiofila. Se evaluaron variables fitosociológicas, dendrométricas y estructurales del estrato arbóreo. El universo de árboles en las ocho comunidades fue de 32 especies arbóreas. Las comunidades pátula y ayacahuite presentaron la mayor diversidad de especies de árboles de acuerdo al índice Shannon; las comunidades pátula, ayacahuite leiofila y oaxacana conformaron un grupo con la mayor mezcla de especies según el Índice Mezcla de Gadow. En las ocho condiciones y en atención al Índice Uniformidad de Ángulos el arreglo espacial horizontal fue aleatorio. El tamaño de los árboles, definido a través de la dominancia en diámetro a nivel de especie, de forma general cubrieron proporcionalmente los diferentes tamaños como árboles dominantes, codominantes y suprimidos.

Palabras clave: Biodiversidad, índices estructurales, *Pinus*, *Quercus*.

II.2. ABSTRACT

COMPOSITION AND SPATIAL STRUCTURE IN MANAGED PINE-OAK FORESTS IN IXTLAN DE JUAREZ, OAXACA, MEXICO.

A comparative analysis of tree species diversity and spatial structure in natural pine-oak sites in Ixtlan de Juarez, Oaxaca, Mexico is presented. Eight phytosociological communities were defined called: patula, oaxacana, seudostrobus, duglasiana, ayacahuite, teocote, rudis and leiofila. Phytosociological, growth and structural variables of the arboreal stratum were evaluated. The universe of trees in the eight communities was of 32 arboreal species. The patula and ayacahuite communities presented the highest species diversity according to de Shannon`s Index, patula, ayacahuite, leiofila and oaxacana communities were the communities with the highest species mingling according to Gadow`s mingling Index. In the eight conditions and in consideration of Uniformity Index the horizontal spatial arrangement was randomly. The tree size, defined through the dominance in diameter to level of species, generally covered proportionally the different sizes as dominant trees, co-dominant and suppressed.

Key words: Biodiversity, structural indexes, *Pinus*, *Quercus*.

II.3. INTRODUCCIÓN

En la región conocida como Sierra Norte, en el estado de Oaxaca, México, los ecosistemas forestales son de gran importancia ecológica, económica y social. Debido a la riqueza en flora y fauna, la Sierra Norte forma parte de una de las 200 ecorregiones prioritarias a nivel mundial para la conservación; además de que el manejo forestal es una de las principales actividades económicas y algunas comunidades indígenas han sido pioneras en el establecimiento de empresas sociales forestales (WWF, 2007).

En Ixtlán de Juárez, comunidad representativa de la Sierra Norte, los aprovechamientos comerciales de madera se pueden clasificar en dos etapas. La etapa de las concesiones estatales, que inició en el año 1956 y concluyó en 1981 bajo la responsabilidad y beneficio de concesionarios particulares (TIASA, 1993) y la etapa comunal, que se ha desarrollado desde 1981 hasta la actualidad, donde la responsabilidad y beneficios del aprovechamiento forestal, son de la misma comunidad.

Debido al correcto manejo de sus bosques, Ixtlán de Juárez recibió el Premio Nacional al Mérito Forestal del año 2000 (CONAFOR, 2007), además cuenta con la certificación de buen manejo forestal desde el año 2001 (SmartWood, 2001) y en el año 2002 el Fondo Mundial para la Naturaleza le otorgó, junto con otras siete comunidades de la región, el “Regalo para la Tierra”, que es el máximo reconocimiento a nivel mundial que brinda esta organización por el trabajo de conservación (WWF, 2007).

No obstante los logros alcanzados, existen diferentes áreas de oportunidad, una es la investigación en aspectos relacionados con la silvicultura y que es necesaria su atención.

II.4. HIPÓTESIS

El presente estudio trata de probar que, la diversidad de especies de árboles y la estructura de los rodales bajo manejo es diferente de acuerdo a la comunidad fitosociológica.

II.5. OBJETIVO

El objetivo del presente estudio fue evaluar y realizar un análisis comparativo de la diversidad de especies de árboles y de la estructura espacial en ocho comunidades vegetales con dominancia de pino-encino.

II.6. ANTECEDENTES

La estructura de la masa forestal se puede definir como la forma en que los diferentes elementos del sistema se organizan en el espacio vertical y horizontal y es el resultado de muchos procesos representando un estado momentáneo de la dinámica de la masa (Kimmins, 1997; Del Río *et al.*, 2003).

La complejidad estructural es resultado de la posición, mezcla de especies, distribución de edades y competencia, lo cual determina directa e indirectamente la presencia y abundancia de diferentes especies de plantas y animales (Spies, 1998; Brokaw y Lent, 1999).

La estructura de un bosque se puede describir mediante tres características: diversidad y mezcla de especies; posición o patrones de distribución espacial de las especies; y diferenciación de tamaños entre árboles (Gadow y Hui, 1999). Particularmente los patrones de distribución de los árboles determinan los regímenes de luz y patrones de regeneración dentro del bosque y tienen una influencia significativa en el desarrollo y producción de madera (Canham *et al.*, 1994; Emborg, 1998).

La vinculación entre estructura y biodiversidad, estabilidad ecológica y el desarrollo futuro de rodales forestales es reconocida. La estructura de los bosques se reconoce como un indicador clave de la biodiversidad, la estabilidad ecológica y el desarrollo futuro de rodales forestales (Kimmins, 1997; Franklin *et al.*, 2002). La simplificación de la estructura de los rodales ha resultado en una disminución de las funciones del ecosistema y por el contrario, la complejidad estructural aumenta la productividad y biodiversidad (Ishii *et al.*, 2004; Crow *et al.*, 2002). Por todo lo que representa, se considera que la estructura de rodales debe ser la base para determinar los índices de diversidad (Lähde *et al.*, 1999).

Los tratamientos silviculturales pueden modificar la estructura del rodal y por lo tanto tienen un papel importante en asegurar la diversidad del rodal y la estabilidad ecológica (Pommerening, 2002). Cada intervención de manejo influye en la estructura del rodal. Simulaciones o monitoreo a largo plazo del desarrollo de estructuras de rodales naturales e intervenidos son usados para evaluar el impacto de las prácticas de manejo (Pretzsch, 1998; Bailey y Tappeiner, 1998).

Numerosos métodos para cuantificar estructuras de rodales forestales han sido propuestos. Ellos pueden ser subdivididos en dos categorías: (1) métodos espaciales, denominados también métodos dependientes de la distancia debido a que toman en cuenta la posición relativa del árbol y (2) métodos no espaciales o métodos independientes de la distancia.

Dentro de los métodos espaciales se pueden identificar dos categorías: (a) índices espaciales y (b) técnicas de estadística espacial (Kint *et al.*, 2000).

Respecto a índices espaciales, varios de ellos han sido presentados por Pielou (1977), Ripley (1981), Upton y Fingleton (1985, 1989). En la última década se han desarrollado índices basados en relaciones matemáticas de vecindad (Füldner 1995, Pretzsch 1997, Gadow y Hui 1999, Zenner y Hibbs 2000). Cada uno de esos índices cuantifican de forma

separada la característica estructural de los rodales como la posición, mezcla y diferenciación.

En la categoría de técnicas estadísticas espaciales, se ubican metodologías como análisis de patrón de puntos (Penttinen *et al.*, 1992) y geoestadística (Goovaerts, 1997).

Los métodos no espaciales describen características medias del rodal, independientes de la posición relativa del árbol. Índices no espaciales cuantifican la estructura vertical, estructura horizontal o diversidad de especies. Ejemplos son los índices de Shannon y Simpson (Magurran, 2004), el 'Perfil Vertical de Especies' de Pretzsch (1996) o el índice de diversidad dentro del rodal 'LLNS' de Lähde *et al.* (1999).

II.7. MATERIALES Y MÉTODOS

II.7.1. Área de estudio

El estudio se realizó en bosques de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. El área se localiza entre las coordenadas geográficas: 17° 18' 16" y 17° 34' 00" latitud norte; 96° 31' 38" y 96° 20' 00" longitud oeste. Se ubica en un rango altitudinal entre 1900 y 2900 metros sobre el nivel del mar, presenta un clima templado húmedo y subhúmedo con lluvias en verano; con una precipitación que oscila entre 950 mm y 1100 mm al año. La temperatura promedio en la época de primavera-verano es entre 24°C a 26°C y en otoño-invierno entre 20°C a 22°C.

Los bosques se conforman de rodales incoetáneos de segundo crecimiento que han estado bajo aprovechamiento maderable a través de cortas selectivas y/o aclareos con el objetivo de producir madera aserrada y celulosa, se escogieron rodales que fueron intervenidos en un periodo similar, entre 10 años y 15 años previos a la toma de datos.

II.7.2. Diversidad de especies arbóreas

Diseño de muestreo y tamaño de muestra. En el bosque descrito se implementó un diseño de muestreo al azar estratificado, en donde los estratos fueron las comunidades vegetales. El muestreo cubrió un área total de 45,500 m², resultado del levantamiento de 91 sitios de muestreo, cada uno con un área de 500 m², de forma circular. Se registró información sólo para las especies arbóreas mayores de 7.5 cm de diámetro, las variables cuantificadas fueron, la especie, el número de árboles, el diámetro normal y la altura total, así como las distancias y ángulos del árbol central a cada uno de los árboles dentro del sitio. A partir de la información anterior, se derivó la información fitosociológica y dendrométrica.

Composición fitosociológica. Para la definición de la composición fitosociológica se identificaron las especies arbóreas y se registró su dominancia, su abundancia y frecuencia,

variables que representan una estimación del área que ocupan, el número y distribución de las especies, respectivamente.

Para expresar la dominancia se utilizó el área basal (g_i) de los individuos. La abundancia (d_i) se determinó como el número de individuos de la misma especie por hectárea y para evaluar la frecuencia (f_i) se contabilizó como la presencia ó ausencia de la especie en las parcelas de muestreo.

Con los datos de dominancia, abundancia y frecuencia se calculó un valor de importancia (VI) para cada especie en la comunidad (Müller y Ellember, 1974; Treviño *et al.*, 2001) y con él se clasificaron las comunidades vegetales a las cuales se les asignó un nombre acorde a la especie más importante.

Al valor de importancia se le asignó el mismo peso de área basal relativa, número de plantas relativas y frecuencia relativa, fue calculado a través de la expresión:

$$VI_i = \frac{g_i}{\sum G} + \frac{d_i}{\sum D} + \frac{f_i}{\sum F}$$

Donde:

VI_i = valor de importancia de la i -ésima especie

g_i, d_i, f_i = área basal, número de árboles y frecuencia de la i -ésima especie.

G, D, F = sumatorias de área basal, número de árboles y frecuencia, de todas las especies.

Características dendrométricas. Las variables dendrométricas registradas fueron, el número de árboles por especie, el diámetro normal, a partir del cual se originó el área basal y el diámetro cuadrático (Dq), definido como el diámetro del árbol de área basal promedio y la altura total, se complementaron con mediciones de las distancias y ángulos del árbol central a cada uno de los árboles dentro del sitio de muestreo.

Para cada una de las especies por condición fitosociológica, se registró la distribución diamétrica en categorías de 5 cm iniciando con la categoría de 10 cm.

Diversidad de especies a través del índice Shannon. La medición de la diversidad de especies se realizó a través del Índice de Shannon (Magurran, 2004). Este índice refleja la heterogeneidad de una comunidad sobre la base de dos factores: el número de especies presentes y su abundancia relativa. Conceptualmente es una medida del grado de incertidumbre asociada a la selección aleatoria de un individuo en la comunidad. Esto es, si una comunidad de S especies es muy homogénea, por ejemplo porque existe una especie claramente dominante y las restantes S-1 especies apenas presentes, el grado de incertidumbre será más bajo que si todas las S especies fueran igualmente abundantes.

Este índice es un algoritmo independiente de la distancia, se define a través de la ecuación:

$$H' = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot (\ln p_i)$$

Donde:

p_i = la proporción de individuos encontrados en la i-ésima especie

n = número de especies arbóreas en el bosque .

ln = logaritmo natural.

II.7.3. Composición de la estructura

Diseño y tamaño de muestra para el cálculo de índices estructurales. El fundamento para el cálculo de los índices descriptivos, consistió en utilizar como unidad de muestreo al grupo estructural (Figura II.1), que es un conjunto de cinco árboles, de los cuales un árbol sirve de referencia e incluye los cuatro árboles vecinos más cercanos con los que convive (Pommerening, 2002).

El tamaño de muestra para este análisis lo constituyeron 2612 grupos estructurales, los cuales fueron derivados de la información de distancias y ángulos contenidos en los 91

sitios de muestreo, a través de su ubicación por medio de coordenadas cartesianas y la aplicación de funciones trigonométricas. Se excluyeron del análisis aquellos árboles de referencia ubicados cerca del límite del sitio cuyos árboles vecinos se encontraban fuera del radio de interés y con ello reducir la estimación del error (Pommerening y Stoyan, 2006).

Descripción de la estructura. La estructura del bosque se describió mediante tres características: mezcla de especies, patrón de distribución espacial horizontal y la diferenciación de tamaños entre árboles. Para ello se utilizaron, respectivamente, el Índice Mezcla de Gadow; el Índice Uniformidad de Ángulos y el Índice de Dominancia.

Índice Mezcla de Gadow M_i , (Gadow, 1993). Este índice se utilizó para describir el grado de mezcla, se define como la probabilidad de que alguno de los árboles vecinos más cercanos sea de la misma especie que el árbol de referencia.

El Índice Mezcla de Gadow se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$M_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij};$$

donde:

$v_{ij} = 0$ cuando el árbol vecino j pertenece a la misma especie que i y 1 cuando pertenece a otra especie.

El grupo estructural puede tomar uno de los siguientes valores: 0; 0.25; 0.50; 0.75 ó 1. Para el cálculo del índice a nivel de rodal, todos los valores de M_i se suman y se dividen por el número de árboles. Este índice varía de 0 a 1; cuanto más próximo a 1 más mezcladas se encuentran las especies y cuanto más próximo a 0 significa una tendencia a formar grupos uniespecíficos.

Índice Uniformidad de Ángulos (W_i). Este índice permite conocer el grado de regularidad de la distribución espacial de los árboles en el rodal, a partir de la definición de los ángulos entre árboles (Füldner, 1995; Gadow *et al.*, 1998).

El método se basa en medir ángulos (α) entre pares de árboles vecinos considerando como punto de inflexión el árbol de referencia. Cada par de árboles vecinos comparte dos ángulos, $\alpha + \beta = 360^\circ$ y $\alpha = \beta$. Suponiendo una regularidad completa de los cuatro árboles vecinos más cercanos alrededor del árbol de referencia, el ángulo estándar esperado (α_0) entre dos árboles vecinos sería de 90° . El índice uniformidad de ángulos es definido como la proporción de ángulos que son más pequeños que el ángulo estándar. Al respecto, Gadow y Hui (2002) indican que el ángulo de 90° puede ser demasiado estricto y en consecuencia clasificar pocas masas como regulares, por lo que proponen reducir el ángulo a 72° , aspecto que se atendió en este estudio.

El Índice Uniformidad de Ángulos (W_i) se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 w_j;$$

donde:

$w_j = 1$ cuando el ángulo α es más pequeño que α_0 ; 0 de otra manera.

Para el cálculo del índice a nivel de rodal, se obtiene la media aritmética de todos los valores de W_i . Los valores que puede tomar el índice uniformidad de ángulos son: 0 que indica estricta distribución regular; 0.25 distribución regular; 0.5 distribución aleatoria; 0.75 distribución irregular; 1 muy irregular (Gadow y Hui, 2002).

Índice de Dominancia (U_i). El atributo de dominancia de vecinos fue propuesto por Hui *et al.* (1998) para cuantificar la dominancia relativa de una especie arbórea dada sobre sus vecinos inmediatos. Aguirre *et al.* (2003) definieron dominancia como la proporción de los n árboles vecinos más pequeños con relación a un árbol de referencia.

El cálculo del Índice de Dominancia a nivel de grupo estructural (U_i) se puede hacer a través de la siguiente expresión:

$$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j ;$$

donde:

v_j = tamaño del árbol vecino j , su valor es 1 cuando es más pequeño que el árbol de referencia i ; es 0 si el árbol vecino j es más grande que el árbol de referencia i .

Los valores de este índice varían de 0 a 1, U_i puede asumir cinco valores; 0 si ninguno de los cuatro árboles vecinos es más pequeño que el árbol de referencia; 0.25 si uno de los árboles vecinos es más pequeño; 0.50 si dos de los vecinos son más pequeños; 0.75 si tres vecinos son más pequeños y 1 si los cuatro vecinos son más pequeños.

Índice de Diferenciación Diamétrica (Td). El principio de este índice se basa en una relación de pares, entre el diámetro del árbol de referencia y el diámetro del primero, diámetro del segundo, diámetro del tercero y diámetro del cuarto árbol vecino más cercano. Se puede expresar a través de la siguiente función:

$$td_i = \frac{1}{4} \sum 1 - \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \text{ donde:}$$

td_i = índice de diferenciación diamétrica del árbol i .

d_{\min} y d_{\max} = diámetros menor y mayor entre i y cada uno de sus cuatro vecinos.

El cálculo de estas variables fue a través del uso del coeficiente de variación (cv) del diámetro de los árboles que forman el grupo estructural. De acuerdo con Gadow y Hui (2002) se asignaron los siguientes parámetros de clasificación: escasa $cv < 0.05$; moderada $0.05 < cv < 0.15$; media $0.15 < cv < 0.30$; alta $0.30 < cv < 0.60$; muy alta $cv > 0.60$.

Para el cálculo de la diferenciación diamétrica de un rodal completo (T_i), se suman todos los valores de td_i y se divide por el número de árboles medidos (N), como se muestra

en la siguiente fórmula: $T_i = \frac{1}{N} \sum td_i$

Este índice varía entre 0 y 1. Cuando todos los árboles tienen el mismo tamaño, es decir un $cv < 0.05$, les corresponde el valor 0 y conforme mayor es la diferencia se aproxima a 1. De esta forma un cv entre 0.05 y 0.15 le corresponde un valor de 0.25; cv entre 0.15 y 0.30 adquiere un valor de 0.50; cv entre 0.30 y 0.60 un valor de 0.75 y cv mayores de 0.60 su valor es de 1.

Índice de Diferenciación en Altura (Th). Este índice se basa en la comparación entre la altura del árbol de referencia y la altura de cada uno de los cuatro árboles circunvecinos (Gadow, 1993; Földner, 1995). Se puede expresar a través de la siguiente función:

$$th_i = \frac{1}{4} \sum 1 - \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \quad \text{Donde:}$$

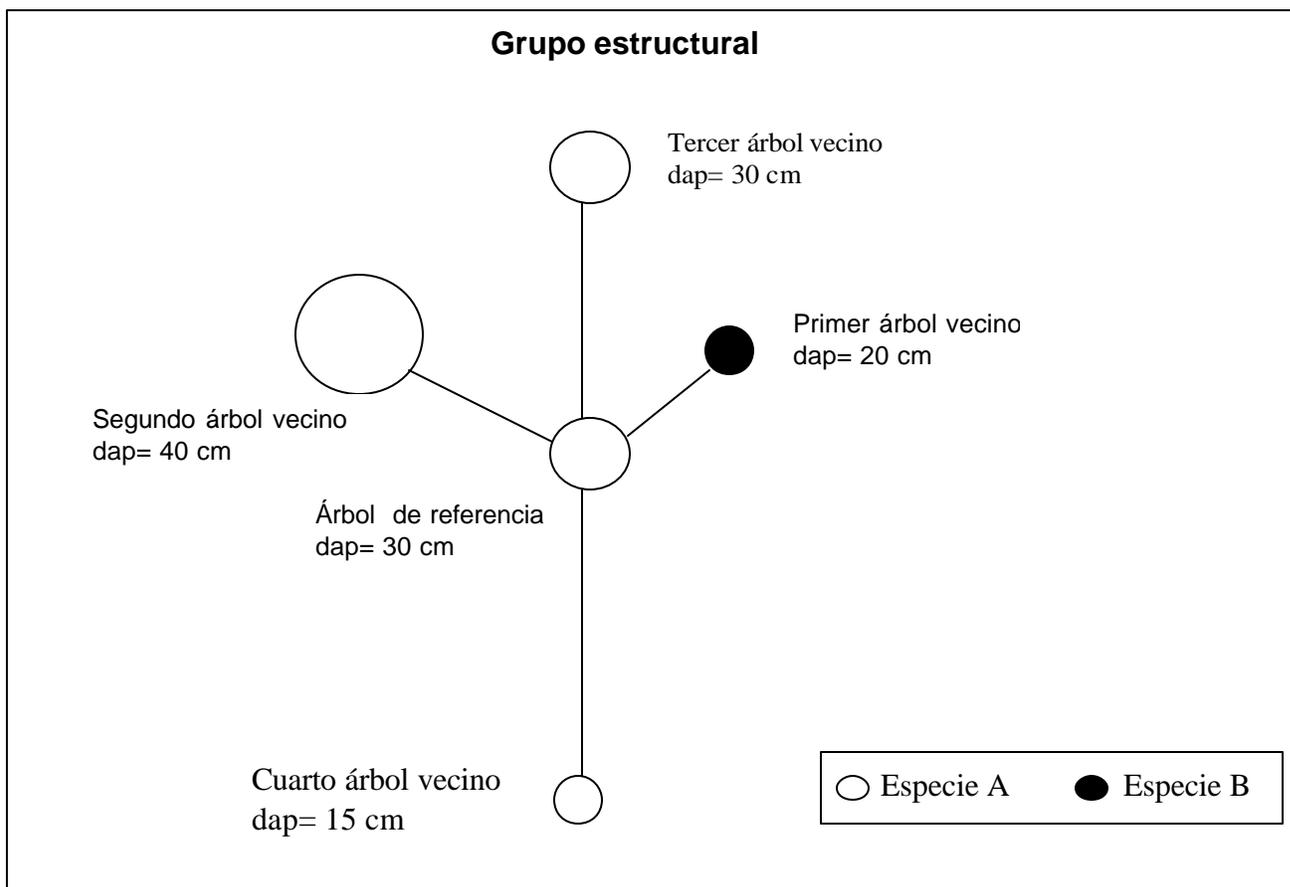
th_i = índice de diferenciación en altura del árbol i .

h_{\min} , h_{\max} = alturas menor y mayor entre i y cada uno de sus cuatro vecinos.

La definición de los criterios de clasificación fue a través del uso de coeficientes de variación (cv) de la altura de los árboles que forman el grupo estructural. De acuerdo con Gadow y Hui (2002) se asignaron los siguientes parámetros de clasificación: escasa $cv < 0.05$; moderada $0.05 < cv < 0.15$; media $0.15 < cv < 0.30$; alta $0.30 < cv < 0.60$; muy alta $cv > 0.60$. Para el cálculo de la diferenciación en altura de un rodal completo (TH_i), se suman todos los valores de th_i y se divide por el número de árboles medidos (N), como se muestra

en el siguiente modelo: $TH_i = \frac{1}{N} \sum th_i$

Este índice varía entre 0 y 1. Cuando todos los árboles tienen la misma altura les corresponde el valor 0 y conforme la diferencia es mayor se aproxima a 1.



Índice	Ejemplo de cálculo	Interpretación
Mezcla de especies (Mi)	$\frac{1+0+0+0}{4} = 0.25$	Uno de los cuatro árboles vecinos es de especie diferente que el árbol de referencia.
Uniformidad de Ángulos (Wi)	$\frac{1+1+0+0}{4} = 0.5$	Dos de los ángulos entre los cuatro árboles vecinos y el árbol de referencia son más pequeños que el ángulo estándar, presenta una distribución aleatoria.
Dominancia (Ui)	$\frac{1+1+0+0}{4} = 0.50$	Dos de los árboles vecinos son más pequeños (en diámetro) que el árbol de referencia.

Figura II.1. Grupo estructural y ejemplo del cálculo de los índices, Mezcla de especies (Mi), Uniformidad de Ángulos (Wi) y Dominancia (Ui).

II.7.4. Análisis estadístico

El procedimiento estadístico que se utilizó para definir la existencia de diferencias, tanto en la diversidad de especies arbóreas como en la composición estructural entre las ocho comunidades fitosociológicas identificadas fue el siguiente.

En primer lugar se amplió la base de datos a partir de datos ya existentes. Para ello se utilizó la técnica de remuestreo “bootstrap” estándar, la cual abre la posibilidad de disponer de mayor cantidad de n valores de cada índice para cada condición. La técnica de remuestreo “bootstrap” fue desarrollada por Efron (1979), en esencia consiste en generar y ampliar una nueva base de datos a partir de datos ya existentes. Se basa en dividir la muestra original en N submuestras aleatorias de tamaños variables a través del remuestreo con reemplazamiento.

En segundo lugar se determinó la distribución de probabilidades de los índices de diversidad obtenidos. Con la información de las 1000 submuestras, generadas a partir de la técnica de remuestreo “bootstrap” para cada una de las condiciones fitosociológicas, se determinó la distribución de probabilidades de los índices de diversidad obtenidos, para ello se utilizó la prueba de bondad de ajuste para normalidad de Kolmogorov-Smirnov.

Con base en los resultados de la prueba Kolmogorob-Smirnov, la cual permitió definir que la distribución de los índices bajo análisis no es normal, se decidió llevar a cabo, en tercer lugar, una prueba estadística para determinar, si las ocho comunidades son iguales o existen diferencias entre ellas, con base en los índices estimados.

Para ello se realizó un análisis no paramétrico, a través de la prueba de Kruskal Wallis, bajo los supuestos de aleatoriedad e independencia de las muestras, bajo la hipótesis nula de igualdad de medianas.

El estadístico de prueba es:

$$T = \frac{12}{N(N+1)} \sum \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \text{ donde:}$$

N : número total de elementos

R_i : Rango promedio del grupo i

n_i : número de elementos del grupo i .

La regla de decisión es: "Rechazar H_0 si $T > X_a^2(t-1)$ "

Una vez que se hizo la comparación de los índices entre todas las comunidades fitosociológicas y el resultado mostró que no existe igualdad entre todas ellas, fue de interés saber concretamente que comunidad (es) se comporta estadísticamente diferente. Para ello se desarrolló la prueba de comparaciones múltiples de Nemenyi (Zar, 1999), con esta prueba se compara cada uno de los algoritmos del grupo con el resto.

El estadístico usado se muestra en la siguiente expresión:

$$\frac{\bar{R}_B - \bar{R}_A}{\sqrt{\frac{k(k+1)}{12n}}} = q_{a,q,k}$$

Para ello, se calcula la distancia crítica (DC) y se consideran significativas las diferencias entre las condiciones fitosociológicas cuyos rangos medios difieren en una cantidad mayor a DC. Para ambas pruebas se planteó un nivel de significancia de 95 % ($\alpha = 0.05$).

$$DC = q_{a,q,k} \sqrt{\frac{k(k+1)}{12n}}$$

II.8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

II.8.1. Diversidad de especies arbóreas

Composición fitosociológica. En lo que respecta a la composición fitosociológica y con base en los resultados del Valor de Importancia (VI), se identificaron ocho comunidades vegetales, denominadas de acuerdo a la especie dominante: pátula (*Pinus patula* Schl et Cham), oaxacana (*P. oaxacana* Mirov), pseudostrobus (*P. pseudostrobus* Lindley), duglasiana (*P. douglasiana* Mtz), ayacahuite (*P. ayacahuite* Ehrenberg), teocote (*P. teocote* Schl et Cham), rudis (*P. rudis* Ende) y leiophila (*P. leiophylla* Schl et Cham). La información de dominancia, abundancia y frecuencia con la que se originó el VI, se muestra en la sección de características dendrométricas.

El universo de árboles en las ocho comunidades fue de 32 especies arbóreas, presentes de forma alterna (Cuadro II.1). La comunidad pátula presentó 26 especies arbóreas y la comunidad rudis 4 especies, para ser las condiciones con la mayor y la menor presencia.

En cada comunidad, de dos a cinco especies registraron Valores de Importancia igual o mayor de 5%. Esto significa, no obstante tener un número razonable de especies en cada comunidad, que en la mayoría de los casos se trata de árboles en menor número, de pequeñas dimensiones y distribuidos esporádicamente. Situación que coincide con la teoría neutral de Hubbell (2001) de dinámica de bosques, que sugiere que si las especies comienzan con pequeñas poblaciones, las especies comunes debieron haberse establecido gracias a alguna ventaja.

La comunidad pátula presentó 26 especies arbóreas, para ser la condición con la mayor diversidad, pero solo cinco especies tienen representación significativa. El VI para *Pinus patula* fue de 40.8%, cifra que la convierte en la especie más importante, el siguiente valor le correspondió a una especie de *Quercus* con 12.2%. Las diferencias de valor a favor de

alguna especie, se traduce en mayor dominio, mejor nivel de competitividad y de mayor contribución en la comunidad, resultado de haber tenido las cifras más elevadas en área basal, número de árboles y frecuencia.

Entre los factores principales que pueden promover que un número elevado de especies coexistan, de acuerdo a las condiciones observadas en el área de estudio, se pueden citar (Wright, 2002; Leigh *et al.*, 2004), la especialización de las plantas en diferentes estratos del bosque y en diferentes hábitats dentro de una región que les permite utilizar los recursos escasos como la luz, agua y nutrientes en diferentes formas; y la presencia de disturbios a través de la caída de árboles y la apertura de claros, los cuales modifican los niveles de luz y ambientes radiculares, donde llegan a coincidir especies heliófilas y tolerantes a la sombra.

La condición rudis presentó cuatro especies, para ser la de menor diversidad. Esta condición se distribuye a la mayor altitud en la zona de estudio, entre los 2600 m y 2900 m, con presencia de heladas en la estación invernal. Al respecto Leigh *et al.* (2004) comentan de una serie de adaptaciones anatómicas que presentan las especies, para evitar el efecto de las heladas y también se preguntan si este factor ambiental limita la diversidad de árboles.

Llama la atención la comunidad leiofila donde cinco especies presentan VI mayores de 10% y las diferencias entre ellos no son tan significativas como en las otras comunidades. Estos valores de importancia similares, con registros elevados, puede significar alta competencia y/o asociación entre las especies. Neumann y Starlinger (2001) mencionan que la composición en el estrato arbóreo está influenciado, tanto por el manejo forestal como por la competencia inter-específica que puede resultar en una fuerte reducción del número de especies dentro de un rodal forestal.

Otra lectura posible de hacer en el Cuadro II.1, es la identificación de especies que se mezclan en las diferentes comunidades y su grado de participación en cada una de ellas. Por ejemplo *Pinus patula*, *Pinus ayacahuite* y *Pinus teocote* presentan amplia distribución, en tanto *Pinus rudis* su distribución es restringida.

Cuadro II.1. Especies presentes y valor de importancia (VI en %) en cada una de las ocho comunidades fitosociológicas.

ESPECIE	VI POR COMUNIDAD							
	Pat	Oax	Seudos	Douglas	Ayaca	Teo	Rudis	Leio
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	40.9	0.9	18.0	10.3	5.9		6.4	2.1
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	0.2	44.3	1.3	4.8				14.2
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	6.0	0.9	44.2	2.9	13.4	5.3		
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.	0.8	0.6		37.3		2.4		
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	8.3	0.6	5.3	1.4	30.1		7.4	2.7
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	1.0	4.8	1.6	1.7	1.2	46.1		12.9
<i>Pinus rudis</i> Ende							64.5	1.9
<i>Pinus leiophylla</i> Schl et Cham.		4.5		2.9				25.7
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	4.8	11.3	2.0	6.7	10.4	16.1		10.7
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	12.2	13.1	11.3	25.2	0.8	17.0		18.8
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	10.8	9.2	7.4	2.0	14.8	2.6	21.7	4.5
<i>Clethra lanata</i> Michx.	3.2		1.2		7.5			
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	1.5	7.0	2.3	4.7		5.5		6.6
<i>Psychotria</i> sp.	1.7				1.3	2.5		
<i>Alnus acuminata</i> Kunth.	1.8				1.6	2.5		
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	0.4		1.0		2.4			
<i>Cinnamomum areolatum</i> (L.)Kosterm.	2.0				2.1			
<i>Abies hickeli</i> Flous et Gausson.	0.7		1.3		2.1			
<i>Litsea</i> sp.	0.3	0.7			1.8			
<i>Pinus michoacana</i>			1.2					
<i>Ternstroemia pringlei</i> Rose.	0.2		1.0		0.8			
<i>Cinnamomum</i> sp.	0.7		1.0		0.9			
Mora montés					1.0			
<i>Cercocarpus</i>		1.1						
<i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Decne et Planch.	0.9				0.9			
<i>Litsea glaucescens</i> H.B.K.	0.2							
<i>Quercus scytophylla</i> Liebm.	0.3							
<i>Quercus laurina</i> Bonpl.	0.6							
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede.	0.5							
<i>Bacharis</i>		0.6						
<i>Rhedia macrophylla</i> (Mtz.) Planch et Triana.	0.2	0.6			0.9			
<i>Viburnum</i> sp.	0.2							

Características dendrométricas. Se presenta información dendrométrica de las especies presentes en cada una de las ocho condiciones fitosociológicas (Cuadros II.2 al II.9). En relación al número de árboles, a nivel de especies dentro de la misma comunidad existen diferencias significativas, siempre fue mayor la presencia de una especie de pino, excepto la comunidad leiofila la cual fue distintiva por el hecho que el mayor número de árboles correspondieron a *Quercus*.

En conjunto *Pinus* y *Quercus* cubren por lo menos el 90% del total de árboles, excepto en las comunidades ayacahuite y pátula donde alcanzaron valores del 77% y 87% respectivamente, cifras que reflejan mayor diversidad de géneros.

La distribución de diámetros de los árboles en general fue muy variable; para los pinos dominantes el menor Dq le correspondió a *P. rudis* con 21 cm y los mayores a *P. oaxacana* y *P. ayacahuite* con 41 cm. En el Anexo 1 aparece la distribución diamétrica de cada una de las especies presentes en las ocho condiciones fitosociológicas.

Como consecuencia de la relación directa entre el tamaño del diámetro y el número de árboles, en cada una de las ocho comunidades, la especie con la mayor AB perteneció a *Pinus*. Resalta la dominancia de *P. rudis* con una participación relativa en AB del 80.8%, en contraste *P. leiophylla* y *P. ayacahuite* a pesar de ser las especies con la mayor AB en sus comunidades respectivas, no alcanzaron a tener mayoría relativa (>50%), esto significa mayor competencia entre las especies al presentar valores de AB más estrechos.

A nivel de género el AB dominante siempre fue para *Pinus*, la menor proporción de AB se presentó en la comunidad douglasiana con un 68% para *Pinus* y 30% para *Quercus*, y la máxima se presentó en la comunidad rudis con el 87% y 13% respectivamente. Con respecto a la altura, el estrato superior fue dominado por el género *Pinus*, con coeficientes de variación que indican la existencia de diferentes pisos. *P. oaxacana*, *P. pseudostrobus* y *P. patula* presentaron la mayor altura promedio.

Cuadro II.2. Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad pátula.

ESPECIE	NA ha ⁻¹		AB (m ² ha ⁻¹)		A		Diámetro (cm)	
	Abs	Rel	Abs	Rel	m	cv	Dq	cv
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	270	40.7	25.83	60.9	24.3	29.7	35	45.2
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	95	14.4	4.36	10.3	13.1	25.1	24	33.5
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	85	12.8	3.24	7.6	13.1	29.9	22	35.2
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	73	10.9	2.32	5.5	14.7	22.5	20	30.9
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	22	3.3	2.60	6.1	23.6	17.3	39	25.8
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	24	3.6	1.29	3.0	13.0	17.9	26	24.8
<i>Clethra lanata</i> Michx.	18	2.7	0.27	0.6	9.9	16.7	14	13.3
<i>Cinnamomum areolatum</i> (L.)Kosterm.	20	3.1	0.49	1.2	12.5	23.1	18	27.7
<i>Alnus acuminata</i> Kunth.	7	1.1	0.20	0.5	13.2	10.5	19	15.5
<i>Psychotria</i> sp.	10	1.5	0.07	0.2	6.6	10.9	10	11.9
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	6	1.0	0.27	0.6	10.0	9.4	23	9.9
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	4	0.5	0.39	0.9	21.5	7.3	37	9.8
<i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Dec. et Plan.	6	1.0	0.09	0.2	14.3	9.5	14	5.0
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.	2	0.3	0.46	1.1	23.3	23.1	51	39.0
<i>Cinnamomum</i> sp.	3	0.5	0.05	0.1	10.2	16.6	14	10.0
<i>Abies hickeli</i> Flous et Gausson.	3	0.4	0.05	0.1	14.1	8.0	16	15.1
<i>Quercus laurina</i> Bonpl.	4	0.5	0.11	0.3	12.1	10.4	19	15.5
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede.	4	0.6	0.23	0.5	20.8	23.6	27	39.9
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	1	0.1	0.01	0.0	8.0	0.0	9	0.0
<i>Quercus scytophylla</i> Liebm.	2	0.3	0.02	0.1	10.5	24.0	12	21.5
<i>Litsea</i> sp.	2	0.3	0.02	0.0	5.0	0.0	12	4.3
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	1	0.1	0.02	0.0	17.0	8.3	17	12.9
<i>Viburnum</i> sp.	1	0.1	0.00	0.0	8.0	17.7	8	17.7
<i>Ternstroemia pringlei</i> Rose.	1	0.1	0.00	0.0	6.0	0.0	10	0.0
<i>Rheedia macrophylla</i> (Mtz.) Plan et Tri.	1	0.1	0.00	0.0	8.0	0.0	10	0.0
<i>Litsea glaucescens</i> H.B.K.	1	0.1	0.00	0.0	4.0	0.0	6	0.0
	667	100.0	42.40	100.0				

Cuadro II.3. Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad oaxacana.

ESPECIE	NA ha ⁻¹		AB (m ² ha ⁻¹)		A		Diámetro (cm)	
	Abs	Rel	Abs	Rel	m	cv	Dq	Cv
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	247	39.1	33.07	73.9	26.3	20.6	41	35.7
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	117	18.6	3.04	6.8	11.3	21.7	18	24.0
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	94	14.9	2.25	5.0	9.4	16.7	17	31.7
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	70	11.1	1.72	3.9	10.3	20.2	18	26.4
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	41	6.6	0.75	1.7	8.1	9.9	15	15.7
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	21	3.4	1.79	4.0	21.3	28.2	33	31.0
<i>Pinus leiophylla</i> Schl et Cham.	21	3.4	1.32	3.0	20.6	34.1	28	32.4
<i>Cercocarpus</i> sp	3	0.5	0.06	0.1	5.0	0.0	17	0.0
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	3	0.5	0.40	0.9	30.5	34.8	42	73.5
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindley.	4	0.7	0.21	0.5	14.7	59.6	25	70.0
<i>Litsea</i> sp.	3	0.5	0.04	0.1	10.0	0.0	14	20.2
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	1	0.2	0.04	0.1	20.0	0.0	20	0.0
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.	1	0.2	0.01	0.0	16.0	0.0	10	0.0
<i>Rhedia macrophylla</i> (Mtz.)	1	0.2	0.01	0.0	9.0	0.0	10	0.0
<i>Bacharis conferta</i>	1	0.2	0.01	0.0	5.0	0.0	8	0.0
	631	100.0	44.74	100.0				

Cuadro II.4. Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad pseudostrabus.

ESPECIE	NA ha ⁻¹		AB (m ² ha ⁻¹)		A		Diámetro (cm)	
	Abs	Rel	Abs	Rel	m	cv	Dq	cv
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindley.	307	51.3	26.21	59.3	25.1	33.7	33	43.8
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	89	14.9	7.56	17.1	23.2	23.5	33	28.3
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	82	13.8	3.55	8.0	12.0	33.2	23	41.8
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	64	10.8	1.76	4.0	10.9	29.0	19	34.0
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	13	2.2	1.74	3.9	28.4	2.8	41	1.5
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	7	1.1	0.37	0.8	6.8	29.1	26	49.0
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	9	1.5	0.92	2.1	17.8	37.8	36	66.7
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	7	1.1	0.52	1.2	24.3	26.4	31	33.0
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	2	0.4	0.49	1.1	37.0	0.0	53	0.0
<i>Abies hickeli</i> Flous et Gausson.	4	0.7	0.26	0.6	16.5	4.3	27	15.7
<i>Clethra lanata</i> Michx.	4	0.7	0.19	0.4	17.0	33.3	23	51.4
<i>Pinus michoacana</i>	2	0.4	0.35	0.8	39.0	0.0	45	0.0
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	2	0.4	0.15	0.3	16.0	0.0	29	0.0
<i>Ternstroemia pringlei</i> Rose.	2	0.4	0.12	0.3	15.0	0.0	26	0.0
<i>Cinnamomum</i> sp.	2	0.4	0.03	0.1	11.0	0.0	13	0.0
	598	100.0	44.21	100.0				

Cuadro II.5. Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad duglasiana.

ESPECIE	NA ha ⁻¹		AB (m ² ha ⁻¹)		A		Diámetro (cm)	
	Abs	Rel	Abs	Rel	m	cv	Dq	cv
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.	464	42.0	20.96	50.6	18.6	31.8	24	45.8
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	332	30.1	10.84	26.2	11.1	32.0	20	40.2
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	164	14.9	3.46	8.3	17.3	37.9	16	37.4
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	56	5.1	1.50	3.6	11.1	23.3	18	14.0
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	20	1.8	2.03	4.9	20.8	21.1	36	39.6
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	16	1.4	0.50	1.2	6.2	10.9	20	5.9
<i>Pinus leiophylla</i> Schl et Cham.	12	1.1	1.59	3.8	21.0	34.3	41	46.8
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	8	0.7	0.08	0.2	11.5	0.0	11	0.0
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	20	1.8	0.19	0.5	7.8	21.1	11	22.1
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	8	0.7	0.28	0.7	16.5	21.4	21	6.7
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	4	0.4	0.03	0.1	10.0	0.0	9	0.0
	1104	100.0	41.46	100.0				

Cuadro II.6. Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad ayacahuite.

ESPECIE	NA ha ⁻¹		AB (m ² ha ⁻¹)		A		Diámetro (cm)	
	Abs	Rel	Abs	Rel	m	cv	Dq	cv
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	203	29.7	26.70	46.1	23.8	32.8	41	49.3
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	137	20.1	8.04	13.9	14.0	51.4	27	73.4
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	57	8.4	9.98	17.2	29.3	14.2	47	22.7
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	86	12.6	4.78	8.2	15.6	32.3	27	37.2
<i>Clethra lanata</i> Michx.	91	13.4	1.68	2.9	11.4	27.7	15	22.8
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	37	5.4	3.53	6.1	25.3	13.0	35	29.8
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	9	1.3	1.03	1.8	17.5	8.3	39	6.1
<i>Cinnamomum areolatum</i> (L.)Kosterm.	11	1.7	0.28	0.5	12.7	7.5	18	6.7
<i>Abies hickeli</i> Flous et Gausson.	6	0.8	0.73	1.3	27.5	0.0	40	0.0
<i>Litsea</i> sp.	6	0.8	0.15	0.3	9.5	0.0	18	0.0
<i>Alnus acuminata</i> Kunth.	3	0.4	0.13	0.2	14.5	0.0	24	0.0
<i>Psychotria</i> sp.	11	1.7	0.14	0.2	11.3	31.9	12	32.6
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	6	0.8	0.37	0.6	21.0	20.2	29	22.3
Mora montés	6	0.8	0.03	0.1	10.0	0.0	8	0.0
<i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Dec. et Plan.	3	0.4	0.14	0.2	12.0	0.0	25	0.0
<i>Rheedia macrophylla</i> (Mtz.) Plan. et Tri.	3	0.4	0.11	0.2	14.0	0.0	22	0.0
<i>Cinnamomum</i> sp.	3	0.4	0.04	0.1	12.0	0.0	13	0.0
<i>Ternstroemia pringlei</i> Rose.	3	0.4	0.02	0.0	6.0	0.0	10	0.0
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	3	0.4	0.01	0.0	8.0	0.0	8	0.0
	683	100.0	57.88	100.0				

Cuadro II.7. Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad teocote.

ESPECIE	NA ha ⁻¹		AB (m ² ha ⁻¹)		A		Diámetro (cm)	
	Abs	Rel	Abs	Rel	m	cv	Dq	cv
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	335	46.5	31.04	68.3	22.7	20.1	34	33.8
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	160	22.2	7.72	17.0	15.3	35.7	25	30.1
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	145	20.1	2.12	4.7	8.2	32.7	14	25.8
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	25	3.5	0.51	1.1	7.0	39.1	16	23.1
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	25	3.5	2.96	6.5	28.0	46.1	39	37.8
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	5	0.7	0.51	1.1	15.0	0.0	36	0.0
<i>Alnus acuminata</i> Kunth.	10	1.4	0.17	0.4	14.0	0.0	15	14.6
<i>Psychotria</i> sp.	10	1.4	0.15	0.3	11.0	12.9	14	36.7
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.	5	0.7	0.25	0.5	12.0	0.0	25	0.0
	720	100	45.42	100.0				

Cuadro II.8. Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad rudis.

ESPECIE	NA ha ⁻¹		AB (m ² ha ⁻¹)		A		Diámetro (cm)	
	Abs	Rel	Abs	Rel	m	cv	Dq	cv
<i>Pinus rudis</i> Endl.	604	74.4	21.30	80.8	14.4	21.4	21	34.3
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	172	21.2	3.44	13.1	7.4	27.9	16	29.0
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	28	3.4	0.89	3.4	13.6	19.8	20	23.1
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	8	1.0	0.73	2.8	18.0	0.0	34	0.0
	812	100.0	26.36	100.0				

Cuadro II.9. Número de árboles (NA), área basal (AB), altura promedio (A), diámetro cuadrático (Dq) y coeficiente de variación (cv) para las especies arbóreas presentes en la comunidad leiofila.

ESPECIE	NA ha ⁻¹		AB (m ² ha ⁻¹)		A		Diámetro (cm)	
	Abs	Rel	Abs	Rel	m	cv	Dq	cv
<i>Pinus leiophylla</i> Schl et Cham.	193	20.7	15.05	41.2	17.2	22.4	31	35.2
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	273	29.3	4.43	12.1	8.5	21.0	14	26.1
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	80	8.6	6.96	19.1	19.6	21.7	33	40.6
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	93	10.0	4.97	13.7	18.4	18.6	26	31.2
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	133	14.3	2.83	7.7	8.6	40.9	16	51.2
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	60	6.4	1.23	3.4	7.8	15.2	16	28.1
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	60	6.4	0.73	2.0	5.3	68.9	12	13.4
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	27	2.9	0.05	0.1	7.0	0.0	5	0.0
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	7	0.7	0.17	0.5	3.0	0.0	18	0.0
<i>Pinus rudis</i> Endl.	7	0.7	0.03	0.1	8.0	0.0	7	0.0
	933	100.0	36.45	100.0				

Diversidad de especies arbóreas a través del Índice Shannon (H'). Los valores promedio del índice de Shannon para cada condición y su comparación estadística entre condiciones se presentan en el Cuadro II.10. Estos valores confirman que el índice de Shannon aumenta conforme es mayor el número de especies presentes y también cuando las proporciones de las distintas especies son elevadas, como lo mencionaron Lähde *et al.* (1999).

Los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov mostraron que, en la mayoría de las condiciones fitosociológicas el índice de Shannon no se distribuyó normalmente, se rechazó H_0 ya que el valor calculado fue mayor que el de P, excepto en la condición duglasiana.

Cuadro II.10. Valores de número de especies, Índice de Shannon (H'), prueba de Kolmogorob-Smirnov, rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis y prueba de Nemenyi para H' en ocho comunidades fitosociológicas.

Comunidad	Número de especies*	Índice Shannon	Kolmogorob-Smirnov Valor	Probabilidad	Kruskal-Wallis Rango Medio H'	Nemenyi
Pátula	26	2.19	0.0356	0.0046	333	A
Ayacahuite	19	2.10	0.0448	0.0001	318	A
Leiofila	10	1.93	0.0354	0.0049	264	B
Oaxacana	15	1.77	0.0467	0.0001	201	C
Seudostrobus	15	1.71	0.068	0.0001	192	C
Duglasiana	11	1.59	0.0273	0.0761	144	D
Teocote	9	1.52	0.0348	0.0061	117	D
Rudis	4	0.88	0.0952	0.0001	31	E

*ver Cuadros II.1 al II.9

Los valores de rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis, para la variable índice de Shannon mostró que estadísticamente existen diferencias significativas entre las comunidades fitosociológicas, con un valor chi-cuadrada de 278.0736, con 7 grados de libertad y un valor p de 0.0001.

Una vez que se decidió rechazar H_0 , a través de la prueba de Nemenyi se estimó una distancia crítica de 39.1, lo que indica que una distancia superior en el valor medio del

rango es significativa. Debido a esta situación se puede decir con una seguridad del 95% que existen cinco grupos estadísticos, lo cual significa que la mayor diversidad vegetal se presenta en las comunidades fitosociológicas pátula y ayacahuite.

Para tener una idea de lo que el valor H' representa se hicieron algunas comparaciones. Corral *et al.* (2005) en dos parcelas de un bosque mesófilo de montaña estimaron $H'=2.46$ donde estaban presentes 22 especies y $H'=2.32$ donde estaban presentes 28 especies en diferentes proporciones. Del Río *et al.* (2003) citan una plantación con cuatro especies en la misma proporción, 25% cada una, con un valor de $H'=2.0$; y otra con dos especies, 50% cada una, con $H'=1.0$

II.8.2. Composición de la estructura

Índice Mezcla de Gadow

En lo referente a los índices estructurales, para el Índice Mezcla de Gadow (M_i), los valores promedio de M_i a nivel de comunidad se presentan en el Cuadro II.11; valores de 0.50 ó 0.75 significan que cualquier árbol, tiene en promedio, a dos ó tres árboles vecinos de especies diferentes. La prueba de Kruskal-Wallis para la variable M_i indicó la existencia de diferencias estadísticas significativas (chi-cuadrado = 191.53 y $p = 0.0001$). A través de la prueba de Nemenyi se estimó una distancia crítica de 215, lo que indica que un valor mayor del rango medio entre dos comunidades es significativo. Las comunidades ayacahuite, leiofila, oaxacana y pátula conformaron el primer grupo estadístico con la mayor mezcla de especies.

Cuadro II.11. Valores promedio para los índices, Mezcla de Gadow (Mi), Uniformidad de Ángulos (Wi), Dominancia (Ui) y rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis (KW) y comparación con la prueba de Nemenyi.

Comunidad	Mi	Rango medio de KW para Mi	Wi	Rango medio de KW para Wi	Ui	Rango medio de KW para Ui
Ayacahuite	0.687	1554a	0.534	1242 ^a	0.498	1326a
Leiofila	0.650	1469ab	0.569	1410 ^a	0.511	1327a
Oaxacana	0.622	1419abc	0.553	1379 ^a	0.513	1333a
Pátula	0.591	1346abcd	0.542	1282 ^a	0.506	1297a
Seudostrobus	0.559	1273bcd	0.561	1303 ^a	0.462	1285a
Duglasiana	0.545	1240cd	0.547	1320 ^a	0.486	1281a
Teocote	0.490	1152d	0.542	1318 ^a	0.516	1348a
Rudis	0.346	636e	0.530	1289 ^a	0.512	1304a

Valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes.

En la Figura II.2 se puede observar la distribución porcentual del índice Mi de las comunidades fitosociológicas representativas y también de la especie de *Pinus* dominante asociada a cada comunidad. A manera de ejemplo, en la condición ayacahuite (Figura II.2e), como representante del primer grupo estadístico, al menos el 61% del número de árboles llegan a convivir con 3 y 4 árboles más cercanos de especies diferentes.

El caso contrastante se muestra en la comunidad rudis (Figura II.2g), que fue la condición donde el 66.5% de los árboles pertenecen a una sola especie o están asociados a una especie diferente y se presentan dos condiciones intermedias, duglasiana y teocote (Figuras II.2d y II.2f). La composición en el estrato arbóreo está influenciado, tanto por el manejo forestal como por la competencia inter-específica (Neumann y Starlinger, 2001) y el índice Mi está determinado principalmente por la abundancia relativa de las especies de árboles (Kint *et al.*, 2003). Especies presentes en alta proporción reflejarán valores bajos de mezcla, como es de suponer al tener pocos vecinos de especies diferentes.

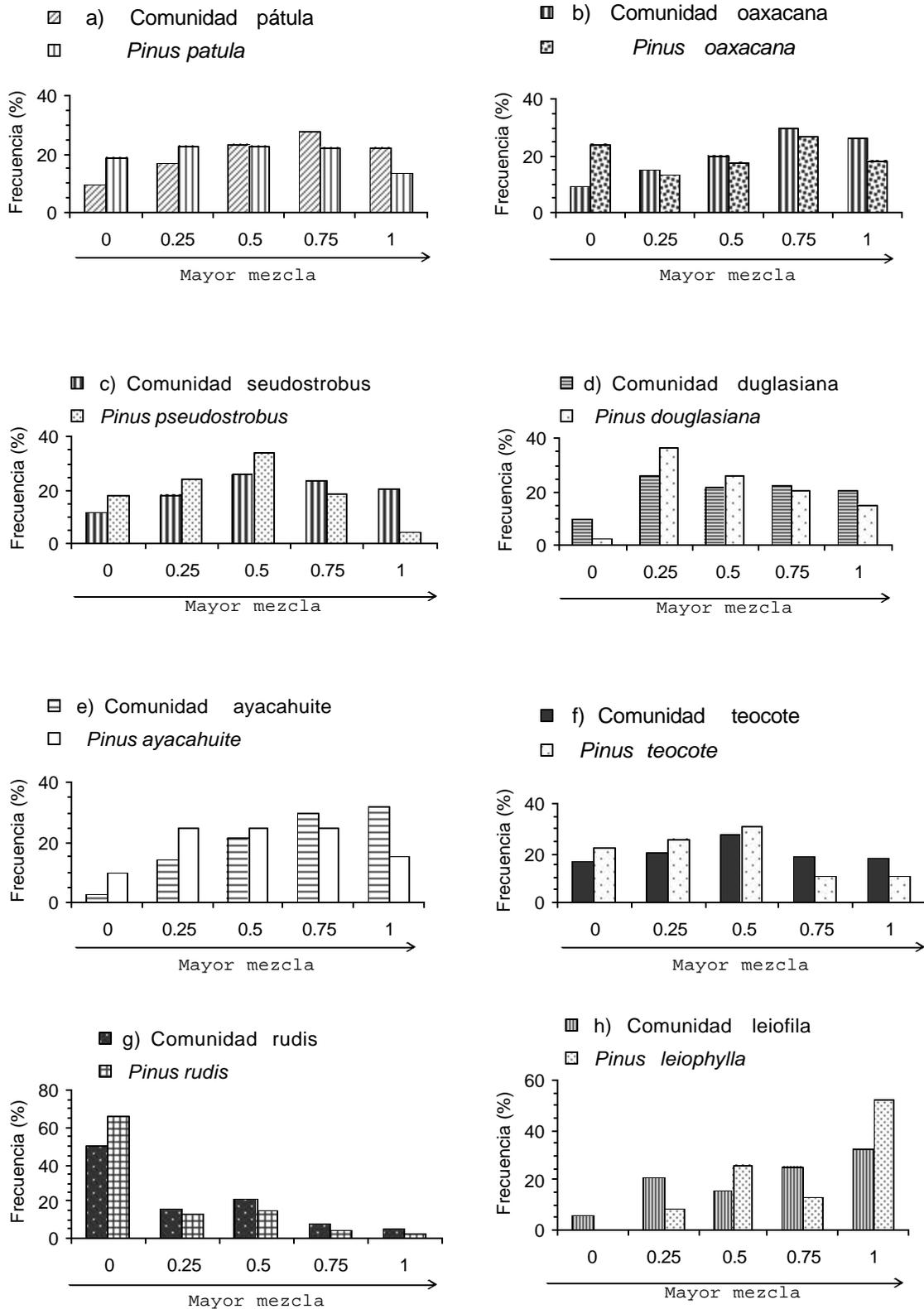


Figura II.2. Distribución del índice Mezcla de Gadow para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de *Pinus* dominante asociada.

Índice Uniformidad de Ángulos (W_i).

Para la variable W_i estadísticamente no hubo diferencias entre las ocho condiciones fitosociológicas. El valor promedio de W_i varió entre 0.530 y 0.569 (Cuadro II.11), lo que significa con base en el trabajo de Gadow y Hui (2002), que de manera general el arreglo espacial horizontal de los árboles fue aleatorio. La especie de pino dominante asociado a cada condición presenta una tendencia similar.

La distribución de W_i para las ocho comunidades bajo estudio puede observarse en la Figura II.3, donde se muestra la tendencia a tener pequeñas desviaciones a partir de la distribución aleatoria de los árboles. Aunque el valor W_i es bastante informativo para caracterizar la distribución de puntos, es aconsejable conocer la distribución de los valores W_i , los cuales dejan ver la variabilidad estructural en un bosque dado.

Los patrones de distribución se ha clasificado típicamente bajo tres patrones generales, regular, aleatorio y en grupos, mismos que llegan a coexistir en diferentes escalas. Para las ocho condiciones, en promedio, el porcentaje de árboles con una distribución en grupos fue del 27% y con una distribución regular el 20%. Estos patrones de distribución han sido vinculados a diferentes procesos, como la creación de huecos, la competencia, regeneración, dispersión, la fase de desarrollo del rodal y las intervenciones silvícolas, entre otros (Zenner y Hibbs, 2000).

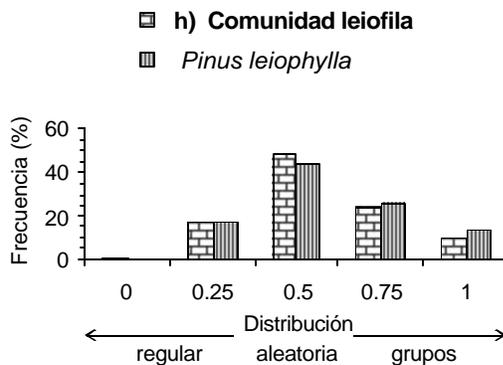
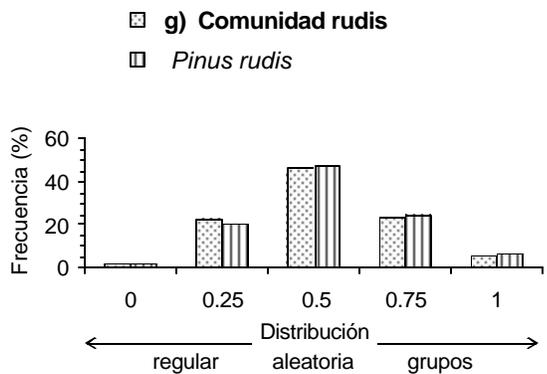
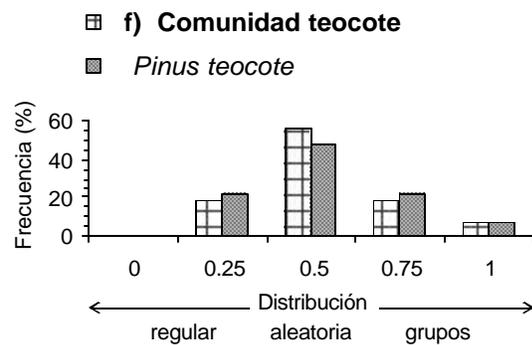
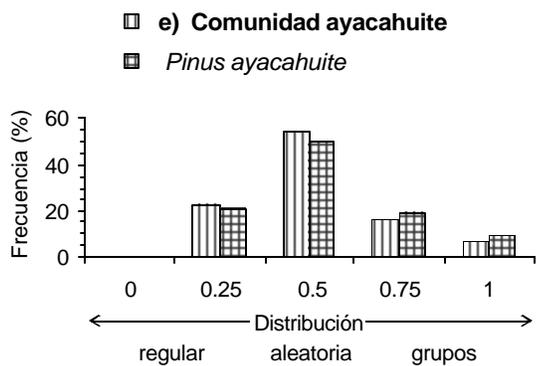
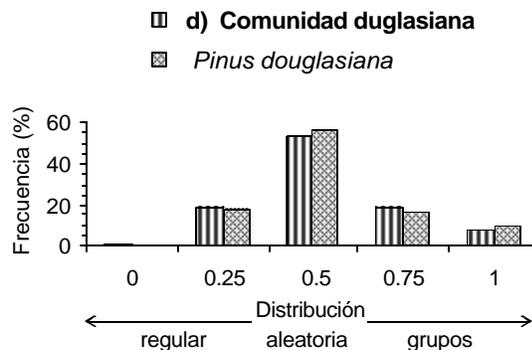
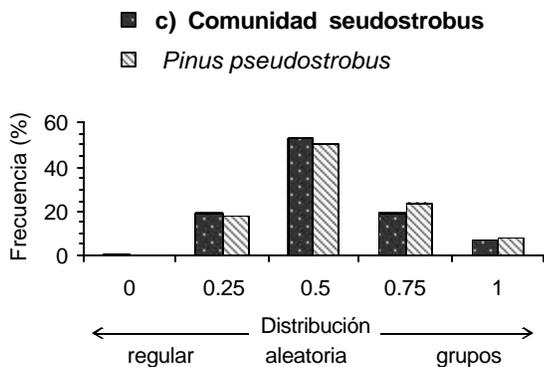
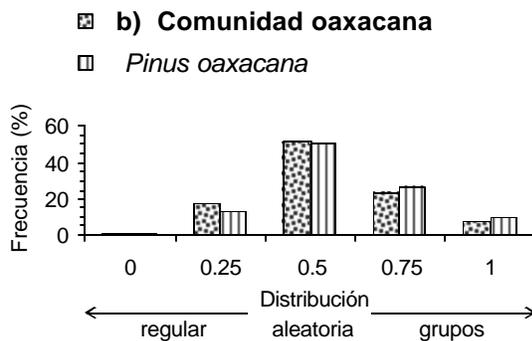
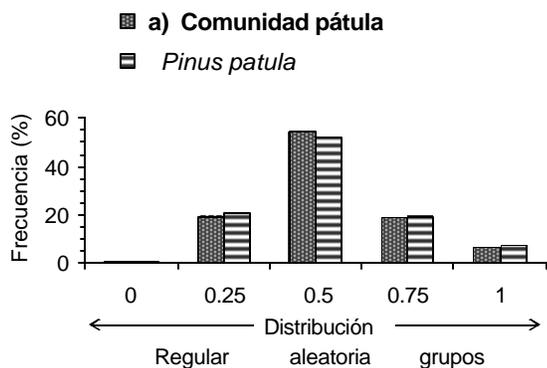


Figura II.3. Distribución del Índice Uniformidad de Ángulos para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de *Pinus* dominante.

Índice de Dominancia (Ui).

Para la variable U_i estadísticamente no hubo diferencias entre las ocho condiciones fitosociológicas. Los valores promedio de U_i en cada una de las comunidades se presentan en el Cuadro II.11. Al hacer una comparación dentro de cada una de las ocho comunidades, se observó que la distribución porcentual se mantuvo de una forma equilibrada, con pequeñas variaciones alrededor de 20% en cada uno de los cinco tamaños clasificados (Figura II.4).

Las especies de *Pinus* dominantes en las diferentes comunidades mostraron en términos generales una tendencia similar, excepto *P. leiophylla* (Figura II.4h) que mostró un comportamiento diferente, la distribución está desbalanceada a la derecha, lo cual significa que la mayoría de los árboles de esta especie son grandes. El 78.3% de los árboles de *P. leiophylla* son dominantes y codominantes, al presentar a su alrededor de 3 a 4 árboles más pequeños.

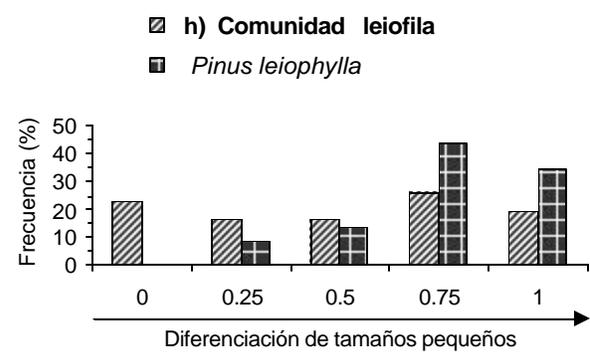
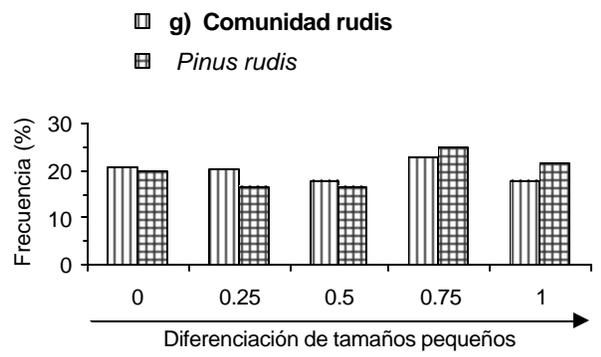
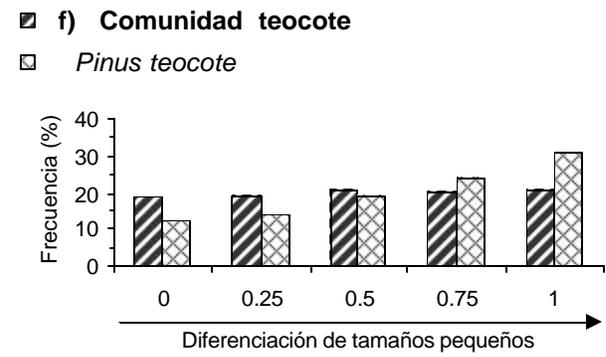
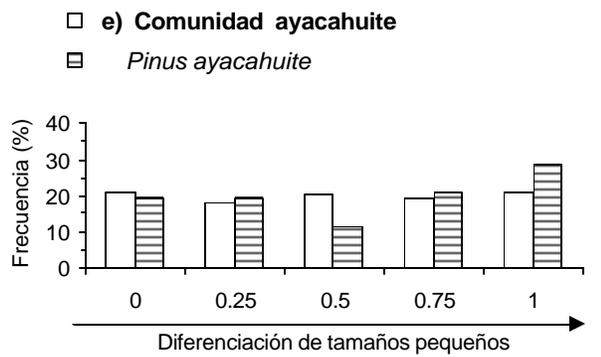
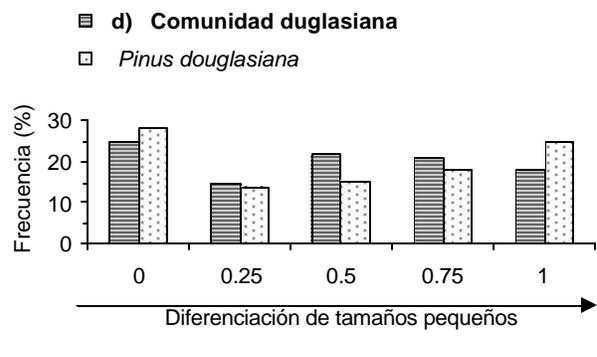
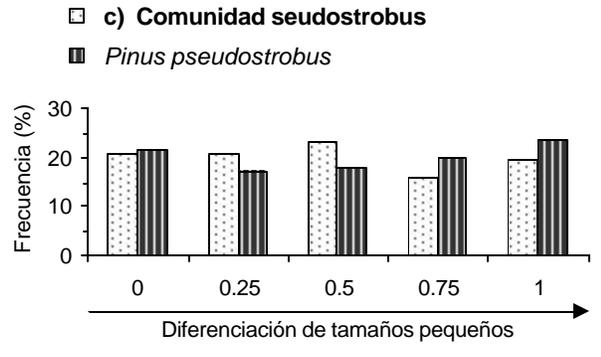
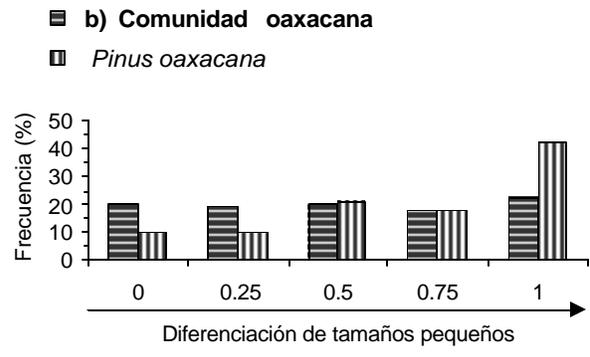
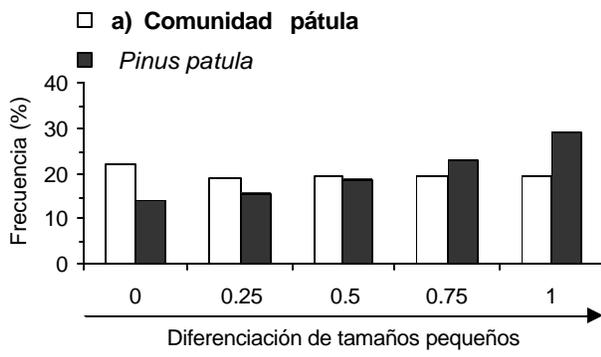


Figura II.4. Distribución del Índice de Dominancia para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de *Pinus* dominante asociada.

Índice de Diferenciación Diamétrica (Td)

Los valores promedio de, Índice de Diferenciación Diamétrica, diámetros de los grupos estructurales y de los coeficientes de variación tanto a nivel de comunidad como de la especie más importante (cuando son árboles de referencia en el grupo estructural) dentro de su comunidad respectiva, se muestran en el Cuadro II.12. En general, el valor medio del Índice de Diferenciación Diamétrica fue considerado como alto, al presentar coeficientes de variación entre el 30% y 60%, excepto en la comunidad rudis y dentro de ella *Pinus rudis* consideradas como una diferenciación media.

Cuadro II.12. Valores promedio de, Índice de Diferenciación Diamétrica (Td), diámetros de los grupos estructurales y de los coeficientes de variación (CV) a nivel de comunidad y de la especie más importante dentro de su comunidad respectiva.

Comunidad	Pátula	Oaxacana	Seudostrobus	Duglasiana	Ayacahuite	Teocote	Rudis	Leiofila
Td	0.71	0.72	0.62	0.71	0.75	0.70	0.61	0.74
Diam. (cm)*	22.6	22.8	24.9	18.2	24.9	22.6	17.9	18.4
CV	0.43	0.44	0.36	0.41	0.48	0.43	0.28	0.45
Especie	<i>Pinus patula</i>	<i>Pinus oaxacana</i>	<i>Pinus pseudostrobus</i>	<i>Pinus douglasiana</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	<i>Pinus teocote</i>	<i>Pinus rudis</i>	<i>Pinus leiophylla</i>
Td	0.68	0.75	0.63	0.72	0.77	0.73	0.54	0.73
Diam. (cm)*	24.2	28.3	25.6	18.2	28.7	23.9	18.2	21.9
CV	0.41	0.46	0.34	0.44	0.49	0.45	0.26	0.43

*Se refiere al diámetro promedio de los grupos estructurales.

En la Figura II.5 se presenta la distribución proporcional del Índice de Diferenciación Diamétrica (Td) por criterio de clasificación para cada comunidad y especie dominante. En ella se observa que la mayoría de los árboles se ubican en las tres últimas clases de diferenciación, lo cual significa que sus vecinos inmediatos presentan diámetros heterogéneos con coeficientes de variación mayores de 15%.

Las diferencias mostradas están en función de la edad, la etapa de desarrollo del rodal y también a las labores de manejo de rodales mezclados, donde el pino es sistemáticamente promovido.

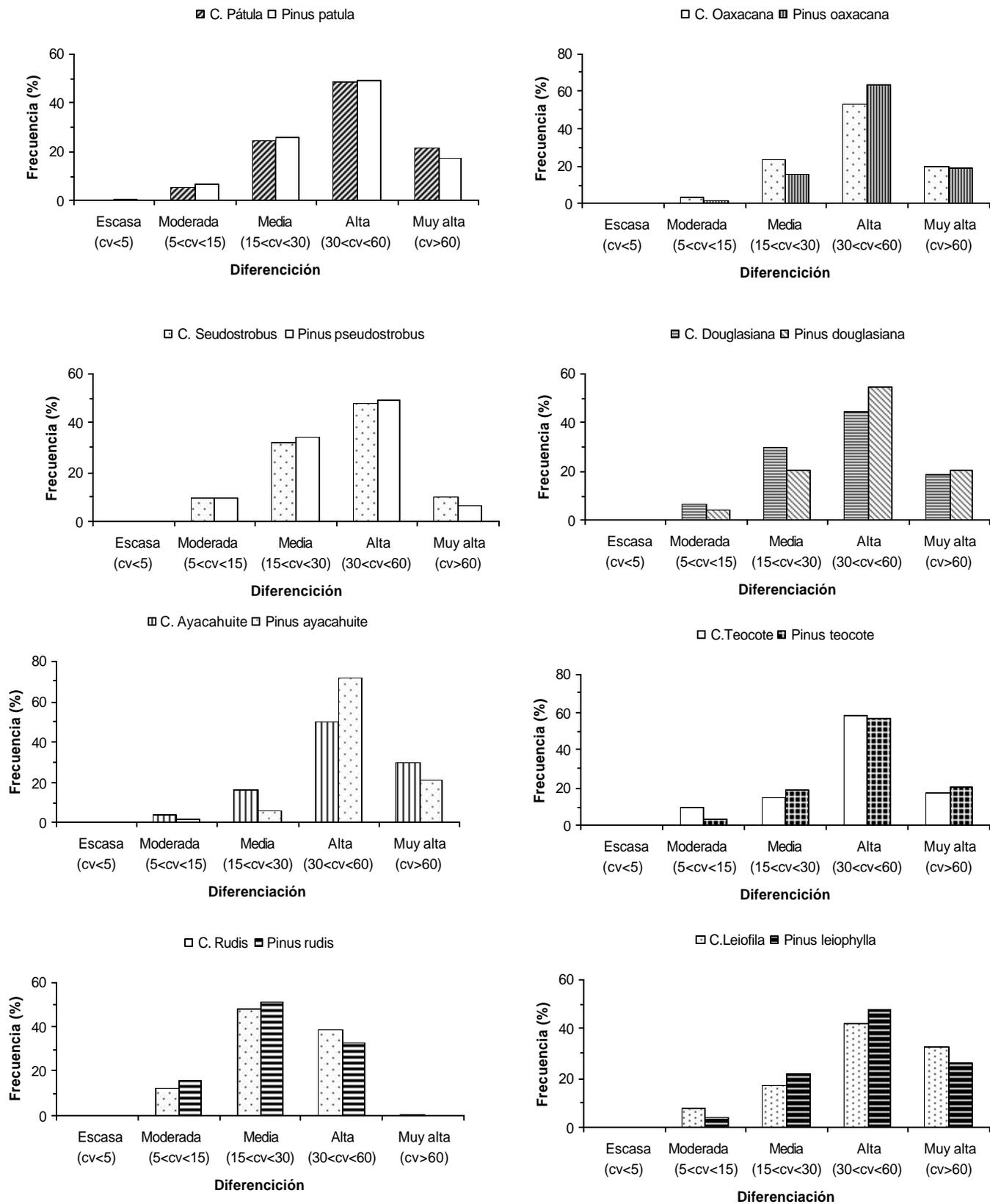


Figura II.5. Distribución del Índice de Diferenciación Diamétrica para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de *Pinus* dominante asociada.

Índice de Diferenciación en Altura (Thi).

Los valores promedio del Índice de Diferenciación en Altura, las alturas promedio de los árboles que conforman los grupos estructurales y los coeficientes de variación de la altura, tanto a nivel de comunidad como de la especie de referencia más importante dentro de la comunidad respectiva, se muestran en el Cuadro II.13. En general, el valor medio del índice de diferenciación en altura fue considerado como alto, al presentar coeficientes de variación mayores al 30%, excepto en la comunidad rudis y en la especie *Pinus rudis* las cuales fueron consideradas como de diferenciación media.

Cuadro II.13. Valores promedio de, Índice de Diferenciación en Altura (Thi), altura de los grupos estructurales y de los coeficientes de variación (CV) a nivel de comunidad y de la especie más importante dentro de su comunidad respectiva.

Comunidad	Pátula	Oaxacana	Seudostrobus	Duglasiana	Ayacahuite	Teocote	Rudis	Leiofila
Thi	0.64	0.66	0.59	0.59	0.66	0.70	0.45	0.73
Altura (m)*	16.10	15.60	17.04	12.77	16.61	14.54	11.25	11.15
CV	0.36	0.38	0.32	0.32	0.36	0.40	0.23	0.45

Especie	<i>Pinus patula</i>	<i>Pinus oaxacana</i>	<i>Pinus pseudostrobus</i>	<i>Pinus douglasiana</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	<i>Pinus teocote</i>	<i>Pinus rudis</i>	<i>Pinus leiophylla</i>
Thi	0.62	0.68	0.59	0.57	0.72	0.64	0.37	0.68
Altura (m)*	17.3	19.9	17.8	13.1	18.7	15.2	11.5	13.2
CV	0.35	0.38	0.31	0.31	0.40	0.36	0.17	0.36

*Se refiere a la altura promedio de los grupos estructurales.

La distribución de valores del Índice de Diferenciación en Altura (Thi) en cada una de las comunidades se presenta en la Figura II.6. Con la finalidad de ejemplificar la lectura que habrá de darse de forma específica en cada gráfica, se tomará como referencia la gráfica correspondiente a *Pinus patula*.

La distribución de valores por categoría mostró que el 44.4% de los árboles tuvieron una diferenciación en altura clasificada como alta y el 11.1 % muy alta, donde se presentan

coeficientes de variación mayores del 30%, esto significa que en la mayoría de los casos y de acuerdo con la altura media, que están conviviendo árboles bajos, medianos y altos.

El 30.7% de los árboles presentaron una diferenciación media, el 12.2 % una diferenciación moderada y el 1.5% una diferenciación escasa, este último grupo caracterizado por disponer de árboles muy parecidos en altura.

La diferenciación de tamaños tanto vertical como horizontal, es resultado de su posicionamiento, mezcla de especies, distribución de edades y competencia, esa diferenciación de tamaños determina la variación espacial en condiciones microclimáticas, la complejidad estructural y aporte de alimento, y de esta forma afecta directa e indirectamente la presencia y abundancia de diferentes animales y especies de plantas (Brokaw y Lent, 1999; Kint *et al.*, 2003).

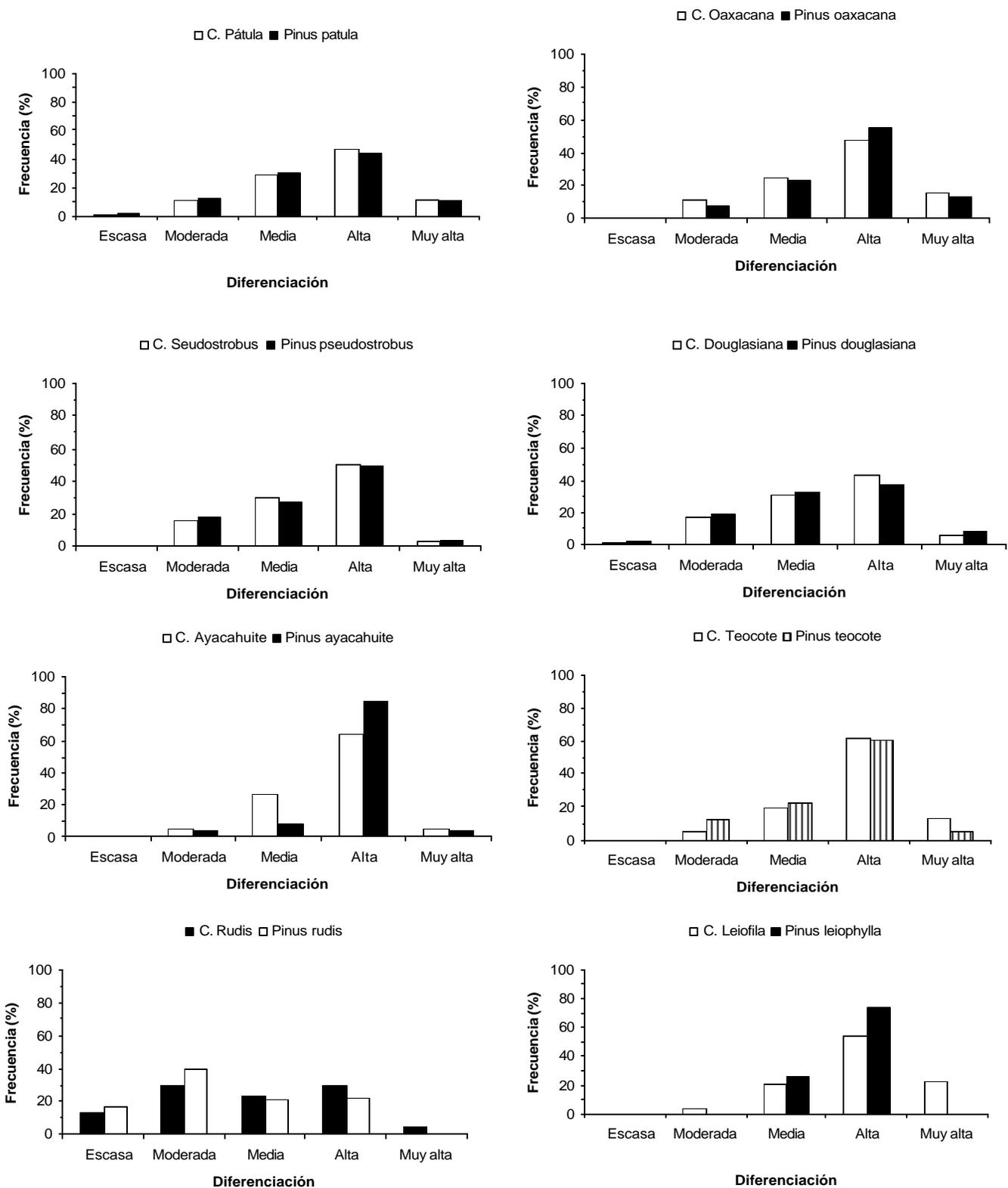


Figura II.6. Distribución del Índice de Diferenciación en Altura para ocho comunidades fitosociológicas y para la especie de *Pinus* dominante asociada.

II.9. CONCLUSIONES

La cuantificación de aspectos relacionados con la estructura de los rodales, son muy importantes para entender el funcionamiento del ecosistema, lo cual puede abonar elementos de decisión para contribuir al manejo forestal sustentable.

Los aspectos sobresalientes del estudio fueron la determinación de la composición en diversidad y mezcla de especies arbóreas, el patrón de distribución y la diferenciación de tamaños entre árboles.

Los índices calculados son sencillos y fáciles de utilizar, aunque aquí se presentaron para un solo momento, las mediciones en series de tiempo y espacio pueden proporcionar información sobre el efecto del manejo y competencia en la estructura de los rodales.

El estudio se presenta a nivel de bosque, bajo la perspectiva que para alcanzar la sustentabilidad ecológica es necesario poner atención tanto en el manejo a nivel de paisaje como el manejo a nivel de rodal.

Los bosques comerciales de pino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, se pueden considerar que son bosques heterogéneos que presentan alta diversidad de especies arbóreas.

Las especies de pinos son las más importantes en cada comunidad vegetal, considerando que son las especies que dominan al ocupar mayor área basal, ser las más abundantes al registrar el mayor número de árboles por unidad de superficie y las más frecuentes al estar distribuidas en la mayor parte del área.

A pesar de la alta diversidad de especies arbóreas, la mayoría de las especies están representadas por árboles en menor número, de pequeñas dimensiones y distribuidos esporádicamente. Sin embargo al hacer una comparación de dominancia entre el grupo de coníferas y el grupo de latifoliadas se observa gran competencia.

El arreglo espacial horizontal de los árboles mostró un patrón general de distribución aleatorio, atribuible a factores naturales, disturbios antropogénicos y condiciones de suelo.

Con base en los resultados de las variables e índices evaluados, llama la atención *Pinus leiophylla* por tener un comportamiento diferente, sus datos reflejan alta competencia, una distribución restringida, es la especie que más se mezcla, en su mayoría son árboles grandes y una mínima proporción son árboles pequeños.

II.10. REFERENCIAS

- Aguirre C., O. A., G. Hui, K. Gadow, and J. Jiménez. 2003. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *For. Ecol. Manage.* 183: 137-145.
- Bailey, D. and J. C. Tappeiner. 1998. Effects of thinning on structural development in 40- to 100-year-old Douglas-fir stands in western Oregon. *For. Ecol. Manage.* 108: 99-113.
- Brokaw, N. V. L. and R. A. Lent. 1999. Vertical structure. In: Hunter, M.L. (Ed). *Maintaining biodiversity in forest ecosystems.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 373-399.
- Canham, C. D., A.C. Finzi, S.W. Pacala and D.H. Burbank. 1994. Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Can. J. For. Res.* 24: 337-349.
- 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. *Invest. Agrar: Sist Recur For* 14(2): 217-228.
- Crow, T. R., D.S. Buckley, E. A. Nauertz, and J. C. Zasada. 2002. Effects of Management on the Composition and Structure of Northern Hardwood Forests in Upper Michigan. *For. Sci.* 48 (1): 129-145.
- Del Castillo, R. F., J. A. Pérez de la R., G. Vargas A. y R. Rivera G. 2004. Coníferas. En: García Mendoza, A. J., M. J. Ordóñez y M. Briones-Salas. (Eds). *Biodiversidad de Oaxaca.* Instituto de Biología-UNAM, WWF, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza. México D.F. pp 141-158.
- Del Río, M., F. Montes, I. Cañellas y G. Montero. 2003. Revisión: índices de diversidad estructural en masa forestales. *Invest. Agrar: Sist Recur For* 12(1):159-176.

- Emborg, J. 1998. Understory light conditions and regeneration with respect to the structural dynamics of a near-natural temperate deciduous forest in Denmark. *For. Ecol. Manage.* 106: 83-95.
- Efron, B. 1979. Bootstrap methods: another look at the jackknife. *The Annals of Statistics*, 1-26.
- Efron, B., J.G. Tibshirani. 1993. An introduction to the bootstrap. Chapman and Hall. London.
- Franklin, J. F., T.A. Spies, R. Van Pelt, A.B. Carey, D.A. Thornburgh, D.R. Berg, D.B. Lindenmayer, M.E. Harmon, W.S. Keeton, D.C. Shaw, K. Bible and J. Chen. 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forest as an example. *For. Ecol. Manage.* 155: 399-423.
- Füldner, K. 1995. Zur Strukturbeschreibung in Mischbeständen. *Forstarchiv* 66: 235-240.
- Gadow, k. Von. 1993. Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung. *Forst und Holz* 21:601-606.
- Gadow, k. Von and G. Hui. 1999. *Modelling Forest Development*. Kluwer Academic Publishers, 213 pp.
- Gadow, k. Von, G. Hui, and M. Albert. 1998. Das Winkelmaß ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Waldbeständen. *Centralblatt für gesamte Forstwesen* 155: 1-9.
- Gadow, k. Von and G. Hui. 2002. Characterising forest spatial structure and diversity. In: Bjoerk, L. (Ed). *Proceedings IUFRO Int. workshop 'Sustainable forestry in temperate regions'*. Lund, Sweden, pp 20-30.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York, 483p.

- Ishii, H.T., S. Tanabe and Hiura T. 2004. Exploring the Relationships Among Canopy Structure, Stand Productivity, and Biodiversity of Temperate Forest Ecosystems. *For. Sci.* 50 (3): 342-355.
- Jiménez P., J., O. A. Aguirre C. y H. Kramer. 2001. Análisis de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México. *Invest Agrar: Sist Recur For* 10(2): 355-366.
- Kaennel, M. 1998. Biodiversity: a diversity in definition. In: Bachmann, P., M. Köhl and R. Päivinen. (Eds). *Assessment of Biodiversity for Improved Forest Planning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.71-81.
- Kimmins, J.P. 1997. Biodiversity and its relationship to ecosystem health and integrity. *For. Chron.* 73:229-232.
- Kimmins, J.P. 1997. *Forest Ecology: A Foundation for Sustainable Management*. Macmillan, New Jersey, 596 pp.
- Kint, V., M. Van Meirvenne, L. Nachtergale, G. Geudens, and N. Lust. 2003. Spatial Methods for Quantifying Forest Stand Structure Development: A Comparison Between Nearest-Neighbor Indices and Variogram Analysis. *For. Sci.* 49 (1): 36-49.
- Lähde, E., Laiho, O., Norokorpi, Y. and Saksa T. 1999. Stand structure as the basis of diversity index. *For. Ecol. Manage.* 115: 213-220.
- Magurran, A. E. 2004. *Measuring biological diversity*. Black-well. Malden, MA. 256 p.
- Neuman, M., and F. Starlinger. 2001. The significance of different indices for stand structure and diversity in forest. *For. Ecol. Manage.* 145: 91-106.
- Penttinen, A., D. Stoyan, and H.M. Henttonen. 1992. Marked point processes in forest statistics. *For. Sci.* 38(4): 806-823.
- Pielou, E.C. 1977. *Mathematical ecology*. Wiley, 385p.

- Pollmann, W. 2003. Stand structure and dendroecology of an old-grow *Nothofagus* forest in Conguillio National Park, south Chile. *For. Ecol. Manage.* 176: 87-103.
- Pommerening, A. 2002. Approaches to quantifying forest structures. *Forestry* 75(3):305-324.
- Pommerening, A., and D. Stoyan. 2006. Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure. *Can. J. For. Res.* 36(7): 1723-1739.
- Pretzsch, H. 1997. Analysis and modeling of spatial stand structures. Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony. *For. Ecol. Manage.* 97: 237-253.
- Pretzsch, H. 1998. Structural diversity as a result of silvicultural operations. *Lesnictví-Forestry.* 44: 429-439.
- Ripley, B. D. 1981. *Spatial statistics.* John Wiley and Sons. 252p.
- Schuler, A. 1998. Sustainability and biodiversity. Forest historical notes on two main concerns of environmental utilisation. In: Bachmann, P., M. Köhl and R. Päivinen. (Eds). *Assessment of Biodiversity for Improved Forest Planning.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 353-360.
- Smitinand, T. 1995. Overview of the status of biodiversity in tropical and temperate forests. In: Boyle, T.J.B., and B. Boontawee. (Eds). *Measuring and Monitoring Biodiversity in Tropical and Temperate Forests.* Cifor. Bogor. Indonesia. pp. 1-4.
- Spies, T.A. 1998. Forest structure: a key to the ecosystem. *Northwest Sci.*72(2):34-39
- Upton G., J.G., and B. Fingleton. 1985. *Spatial data analysis by example, volume 1 - Point pattern and quantitative data.* John Wiley and Sons. Oxford. 410p.
- Upton G., J.G., and B. Fingleton. 1989. *Spatial data analysis by example, volume 2 - Categorical and directional data.* John Wiley and Sons. Oxford. 414p.
- Zenner, E. K., and D.E. Hibbs. 2000. A new method for modeling the heterogeneity of forest structure. *For. Ecol. Manage.* 129: 75-87.

CAPÍTULO III

ESTRUCTURA DE BOSQUES DE PINO PÁTULA BAJO MANEJO EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO.

III.1. RESUMEN

Se evaluó y comparó la diversidad de especies arbóreas y la composición estructural de bosques de pino pátula (*Pinus patula* Schl et Cham) bajo diferentes condiciones silvícolas en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. Se registró información sólo para ejemplares mayores de 7.5 cm de diámetro normal. La diversidad se estimó a través del índice Shannon (H'), la composición estructural se definió mediante tres características, mezcla de especies, distribución espacial y diferenciación de tamaños, a través de los índices, Mezcla de Gadow (Mi), Uniformidad de Ángulos (Wi) y Dominancia (Ui), respectivamente. El análisis se realizó comparando cuatro condiciones silvícolas denominadas, latizal, fustal joven, fustal medio y fustal viejo. Los resultados mostraron que la mayor diversidad arbórea se presentó en los bosques fustal medio y fustal viejo. El mayor grado de mezcla se presentó en la condición fustal viejo. La distribución del árbolado en el terreno, en los cuatro ambientes, presentaron un patrón de distribución aleatorio y la dominancia de pino pátula va en aumento conforme la condición se desarrolla.

Palabras clave: Diversidad arbórea, Índices estructurales, *Pinus patula* Schl et Cham.

III.2. ABSTRACT

STRUCTURE OF MANAGED PINE PATULA FORESTS IN IXTLAN DE JUAREZ, OAXACA, MEXICO.

It was evaluated and compared the diversity of arboreal species and the forest structure composition of *Pinus patula* Schl et Cham under different silvicultural conditions, in Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico. The information was registered only for trees over 7.5 cm of diameter breast height (dbh). The diversity was estimated through the Shannon Index (H'), the structural composition was defined through three characteristics, mingling species, spatial distribution and size differentiation, through the indices, Mingling by Godow (Mi), Contagion (Wi) and Dominance (Ui), respectively. The analysis was carried out comparing four silvicultural conditions called, pole stage, young stem, medium stem and old stem. The comparative results showed that greater diversity was presented in the medium stem and old stem forest. The major mingling degree was presented in the old stem condition. The tree distribution, in the four environments, presented a random distribution pattern and the dominance of *Pinus patula* is increasing while the condition develops.

Key words: Species diversity, structural indices, *Pinus patula* Schl et Cham

III.3. INTRODUCCIÓN

El estado de Oaxaca, México, es considerado uno de los centros de diversidad biológica más importantes a nivel nacional (García *et al.*, 2004). En particular para la región norte del estado, en la que se ubica Ixtlán de Juárez, los ecosistemas de pino-encino son de gran importancia ecológica, económica y social.

En esta región, la mayoría de los bosques de pino-encino se conforman de rodales de segundo crecimiento que han estado bajo aprovechamiento comercial a lo largo de 6 décadas aproximadamente. Los principales tratamientos silvícolas han consistido en la aplicación de cortas selectivas y/o aclareos con el objetivo de producir madera aserrada y celulosa (UIEF Fapatux, 1977); a partir de 1993 se incorporaron cortas de regeneración con el método de árboles padres (TIASA, 1993).

En Ixtlán de Juárez los bosques de pino pátula (*Pinus patula* Schl et Cham) son los de mayor extensión, se distribuyen en aproximadamente 5000 ha y es la especie de mayor importancia económica. La medición cuantitativa de aspectos relacionados con la estructura de los rodales es muy importante para entender el funcionamiento del ecosistema, lo cual puede abonar elementos de decisión para contribuir al manejo forestal.

En las áreas bajo manejo, los tratamientos silvícolas modifican la estructura de los bosques y es por ello que su conocimiento aunado a la dinámica de rodales es fundamental para garantizar la sostenibilidad de estos sistemas. En este sentido, se planteó como hipótesis la existencia de diferencias significativas en la diversidad de especies arbóreas y en la composición estructural de los bosques de pino pátula de acuerdo a la condición silvícola en que se presentan los rodales.

Se ha definido que en bosques manejados, la biodiversidad es un elemento clave para evaluar la estabilidad del sistema (Lähde *et al.*, 1999), en algunos estudios (Crow *et al.*, 2002; Ishii *et al.*, 2004) se ha concluido que la simplificación de la estructura disminuye las

funciones del ecosistema y la complejidad estructural aumenta la productividad y biodiversidad. Aunque no siempre estructuras complejas implican mayor diversidad, existiendo ejemplos contrarios (Hunter, 1999).

En México, los estudios sobre metodologías (Jiménez *et al.*, 2001; Aguirre *et al.*, 2003) y evaluaciones del efecto que causan los tratamientos silvícolas (Corral *et al.*, 2005; Solís *et al.*, 2006) sobre la diversidad estructural son todavía escasos.

III.4. HIPÓTESIS

Existen diferencias significativas en la diversidad de especies arbóreas y en la composición estructural de los bosques de pino pátula de acuerdo a la condición silvícola en que se presentan los rodales.

III.5. OBJETIVO

Evaluar y comparar la diversidad de especies arbóreas y la composición estructural de bosques de pino pátula (*Pinus patula* Schl et Cham) bajo diferentes condiciones silvícolas, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

III.6. MATERIALES Y MÉTODOS

III.6.1. Área de estudio

El estudio se realizó en rodales de pino-encino con dominancia de pino pátula, en el predio de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico, a $17^{\circ} 18' 16''$ y $17^{\circ} 34' 00''$ latitud norte; $96^{\circ} 31' 38''$ y $96^{\circ} 20' 00''$ longitud oeste .

En la región, el pino pátula se distribuye principalmente en un rango altitudinal entre 2000 y 2500 metros, bajo un clima templado húmedo y subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura promedio anual de 20°C y una precipitación promedio anual de 1100 mm.

III.6.2. Diversidad de especies arbóreas

En el bosque de pino pátula se implementó un diseño de muestreo al azar estratificado, en donde los estratos fueron rodales en diferentes condiciones de desarrollo silvícola, definidos como: latizal, fustal joven, fustal medio y fustal viejo.

Los criterios de selección de cada condición silvícola consistieron en, la dominancia de pino pátula, que tuvieran una buena cobertura, con el mayor número de árboles ubicados en las clases diamétricas de 20 cm; 35 cm; 40 cm y 55 cm, para cada condición respectivamente y ser bosques bajo aprovechamiento en diferentes tiempos, con la aplicación principalmente de cortas selectivas.

El muestreo cubrió un área total de $22,000\text{ m}^2$. En cada condición silvícola se registró información en 5500 m^2 , resultado del levantamiento de 11 sitios de muestreo, cada sitio con un área de 500 m^2 , de forma circular. Se registró información sólo para las especies arbóreas mayores de 7.5 cm de diámetro, las variables cuantificadas fueron, la especie, el número de árboles, el diámetro normal y la altura total, así como las distancias y ángulos del árbol central a cada uno de los árboles dentro del sitio.

A partir de la información anterior, se derivó información fitosociológica y dasométrica, así para cada una de las especies se cuantificó su dominancia a través del área basal; su abundancia de acuerdo al número de árboles y su frecuencia a través de la presencia en las parcelas de muestreo; con estos tres datos se generó un valor ponderado para cada especie, denominado Valor de Importancia (VI).

La diversidad de especies arbóreas se estimó a través del Índice de Shannon (Magurran, 2004), el cual es un algoritmo que describe la diversidad de especies independiente de la distancia. El índice refleja la heterogeneidad de una comunidad sobre la base de dos factores: el número de especies presentes y su abundancia relativa, la fórmula correspondiente aparece en el Cuadro III.1.

III.6.3. Composición de la estructura

Las estructuras de las condiciones silvícolas, latizal, fustal joven, fustal medio y fustal viejo, se describieron mediante tres características, mezcla de especies; distribución espacial y diferenciación de tamaños.

El fundamento para el cálculo de los índices descriptivos, consistió en utilizar como unidad de muestreo al grupo estructural, que es un conjunto de cinco árboles, de los cuales un árbol sirve de referencia e incluye los cuatro árboles vecinos más cercanos con los que convive (Pommerening, 2002; Kint *et al.*, 2003).

El tamaño de muestra para este análisis lo constituyeron 1176 grupos estructurales, los cuales fueron derivados de la información de distancias y ángulos contenidos en los 44 sitios de muestreo (11 por condición silvícola), a través de su ubicación por medio de coordenadas cartesianas y la aplicación de funciones trigonométricas. Se excluyeron del análisis aquellos árboles de referencia ubicados cerca del límite del sitio cuyos árboles vecinos se encontraban fuera del radio de interés y con ello reducir la estimación del error (Pommerening y Stoyan, 2006).

Para describir el grado de mezcla de las especies arbóreas se utilizó el Índice Mezcla de Gadow (1993) el cual se define como la probabilidad de que alguno de los cuatro árboles vecinos más cercanos sea de la misma especie que el árbol de referencia.

Para cuantificar la distribución espacial horizontal de los árboles se utilizó el Índice Uniformidad de Ángulos (Gadow y Hui, 2002), el cual se basa en la medición de ángulos entre dos vecinos (a) al árbol de referencia y considerando que la distribución horizontal de los árboles se ha clasificado típicamente bajo tres patrones generales, regular, aleatorio y en grupos (Zenner y Hibbs, 2000).

Para cuantificar la variación existente entre el tamaño de los árboles, en particular para la especie pino pátula, sobre sus vecinos inmediatos, se utilizó el Índice de Dominancia (Aguirre *et al.*, 2003). Para el cálculo se consideró el diámetro normal como variable cuantitativa. En el Cuadro III.1 aparecen las fórmulas de los índices desarrollados.

Cuadro III.1. Fórmulas de los índices de diversidad y estructurales utilizadas.

Índice	Fórmula	Significado
Shannon (H')	$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \cdot (\ln p_i)$	p_i = abundancia relativa de cada especie; n = número de especies.
Mezcla de Gadow (Mi)	$M_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij}$	v_{ij} = 0 cuando el árbol vecino j pertenece a la misma especie que i ; 1 de otra forma.
Uniformidad de Ángulos (Wi)	$W_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j$	w_j = 1 cuando el ángulo a es más pequeño que 72° ; 0 de otra forma.
Dominancia (Ui)	$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j$	v_j = dominancia del árbol vecino j , su valor es 1 cuando el árbol es más pequeño en diámetro que el árbol de referencia i ; 0 de otra forma.

III.6.4. Análisis estadístico

Con la finalidad de comparar estadísticamente los índices, de diversidad y de estructura, entre las condiciones silvícolas identificadas, se amplió la base de datos muestrales a partir de datos ya existentes por medio de la técnica de remuestreo “bootstrap” estándar (Efron, 1979). A partir de la información de 1000 submuestras, se determinó la distribución de probabilidades de los índices a través de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS). Con base en la prueba KS, se decidió llevar a cabo un análisis de varianza no paramétrico de un factor con la prueba de Kruskal Wallis, bajo la hipótesis nula de igualdad de medianas y se complementó con la prueba de comparaciones múltiples de Nemenyi (Zar, 1999). Para ambas pruebas se planteó un nivel de significancia de 95 %.

III.7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.7.1. Diversidad de especies arbóreas

Se registraron para toda la masa forestal 26 especies. De este total, en el bosque latizal se registraron 11 especies; en el bosque fustal joven se cuantificaron 15 especies; fustal medio 17 especies y en el bosque fustal viejo 13 especies.

De las 26 especies, sólo 7 de ellas estuvieron presentes de forma común, es decir en las cuatro condiciones y fueron las mismas que mostraron los mayores VI (Cuadro III.2), destaca pino pátula como la especie más importante, lo cual significa mayor dominancia estructural y un nivel de competitividad mayor dentro de la comunidad.

Las 19 especies restantes y con presencia alterna en las cuatro condiciones presentaron VI menores de 3%, esto significa, no obstante existir un número razonable de especies, que en la mayoría de los casos se trata de árboles en cantidades mínimas, de pequeñas dimensiones y distribuidos esporádicamente.

Cuadro III.2. Valor de importancia (VI), número de árboles (NA), área basal (AB), altura (A) y diámetro ($d_{1.3\text{ m}}$) para las especies comunes en cada condición silvícola.

ESPECIE	VI	NA.ha ⁻¹	AB m ² .ha ⁻¹	Altura (m)		Diámetro (cm)	
	%			A	coef. var	$d_{1.3\text{ m}}$	coef. var
Condición latizal (I) :							
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	51	490	17.0	16	36	21	50
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	11	73	3.6	14	22	25	22
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	8	58	1.5	10	25	18	32
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	12	100	2.0	16	23	16	32
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	7	20	0.8	17	23	22	32
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	2	10	0.2	8	40	17	34
<i>Clethra lanata</i> Michx.	4	15	0.2	9	25	13	9
Condición fustal joven (II):							
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	40	236	21.4	23	27	34	40
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	16	87	5.3	12	13	28	11
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	11	89	3.1	14	33	21	25
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	10	73	3.0	16	26	23	30
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	3	18	0.7	15	41	22	45
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	5	27	2.0	15	24	31	66
<i>Clethra lanata</i> Michx.	4	27	0.4	9	10	13	12
Condición fustal medio (III):							
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	39	233	29	26	16	40	26
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	10	98	4	11	35	23	49
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	6	75	1	12	31	15	46
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	6	63	3	17	20	24	25
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	6	18	2	28	21	39	35
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	8	38	1	12	25	18	22
<i>Clethra lanata</i> Michx.	2	25	0	8	20	13	10
Condición fustal viejo (IV):							
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	32	123	28.2	34	15	54	25
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	15	123	7.1	15	26	27	31
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	13	110	4.6	16	31	23	37
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	7	43	2.1	18	20	25	35
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	7	17	4.4	35	8	58	19
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	6	23	0.5	14	13	16	14
<i>Clethra lanata</i> Michx.	4	23	0.4	11	32	14	16

Otras especies y ubicación: *Cinnamomum areolatum* (L.)Kosterm (II,III,IV); *Psychotria* sp (I, II,III); *Arbutus xalapensis* Kunth (I,II,III); *Alnus acuminata* Kunth (III,IV); *Pinus teocote* Schl et Cham (III); *Dendropanax arboreus* (L.) Decne et lanch (IV); *Pinus douglasiana* Mtz (II, III); *Cinnamomum* sp (III, M); *Pinus oocarpa* Schiede (III); *Abies hickeli* Flous et Gausson (IV); *Quercus laurina* Bonpl (II); *Litsea glaucescens* H.B.K.(I); *Litsea* sp (III); *Prunus serotina* Ehrh (II); *Pinus oxacana* Mirov (I); *Ternstroemia pringlei* Rose (IV); *Quercus scytophylla* Liebm (II); *Rhedia macrophylla* (Mtz.) Planch et Triana (II); *Viburnum* sp (III).

Para la condición latizal, el número total de árboles fue de 780 y el área basal (AB) de 25.3 m².ha⁻¹; en la condición fustal joven se registraron 607 árboles y un AB de 37.6 m².ha⁻¹; la condición fustal medio presentó 665 árboles y el AB de 47.4 m².ha⁻¹ y en la condición fustal viejo el número de árboles fue de 597 y el AB de 50 m².ha⁻¹; en la Figura III.1 se presenta la distribución diamétrica de pino pátula en cada una de las condiciones.

En el Cuadro III.2 se observa que el número de árboles para las especies de pino decrece conforme la condición fitosociológica se desarrolla, ocasionado por la mortandad de árboles sobre todo de categorías pequeñas, atribuible a la alta competencia y a la intolerancia a la sombra. Para el caso de las latifoliadas, se mantiene e inclusive en algunas especies presentan una tendencia a la alza, debido a la capacidad de rebrote que presentan, al incremento en diámetro y su incorporación en categorías mayores.

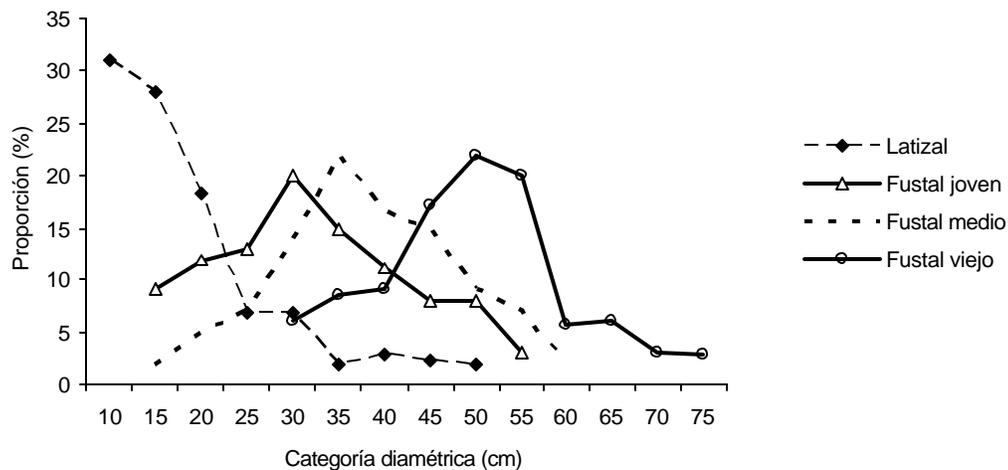


Figura III.1. Distribución de categorías diamétricas de pino pátula por condición.

Los valores de la diversidad de especies, cuantificada a través de H' se presenta en el Cuadro III.3, la prueba de Kolmogorov-Smirnov mostró que H' no se distribuye normalmente ($k_s = 0.0438$ $p = 0.0001$). La prueba de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticas significativas en términos de diversidad arbórea entre las condiciones ($\chi^2 = 2518.39$ y un valor $p = 0.0001$). A través de la prueba de Nemenyi se definió que la mayor diversidad arbórea se presentó en los bosques fustal medio y fustal viejo.

Cuadro III.3. Valores promedio del Índice Shannon (H'), rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis (KW) y comparación múltiple con la prueba de Nemenyi por condición silvícola.

Condición silvícola	Número de Especies	Índice H'	Rango Medio de KW para H'	Prueba de Nemenyi
Latizal	11	1.3	631	c
Fustal joven	15	1.9	1716	b
Fustal medio	17	2.17	2965	a
Fustal viejo	13	2.16	2687	a

A pesar que en la condición fustal medio se registró mayor número de especies que en la condición fustal viejo, los valores de H' estadísticamente pertenecen al mismo grupo de significancia, atribuibles a las mayores abundancias relativas de las especies latifoliadas de la última condición, una situación similar se presentó entre las condiciones fustal joven y fustal viejo. Lo anterior confirma que H' aumenta de valor conforme es mayor el número de especies presentes y también cuando las proporciones de las distintas especies son similares.

De lo anterior se deriva que la aplicación de tratamientos silvícolas han modificado las condiciones de diversidad y abundancia de las especies arbóreas presentes. En bosques templados de Durango, Solís *et al.* (2006) registraron también que las cortas selectivas disminuyeron la diversidad arbórea.

III.7.2. Composición de la estructura

En lo que corresponde al grado de mezcla de las especies, la prueba de Kruskal-Wallis detectó la existencia de diferencias estadísticas significativas ($\chi^2 = 53.7412$ y $p = 0.0001$) entre las condiciones bajo estudio (Cuadro III.4). A través de la prueba de Nemenyi se definió que, la condición fustal viejo con un índice M_i de 0.70, se mezcla en mayor grado que el resto de las condiciones, ello significa que en promedio, de los cuatro árboles circunvecinos más cercanos al árbol de referencia, tres de ellos pertenecen a especies diferentes.

El índice de mezcla está determinado principalmente por la abundancia relativa de las especies de árboles, especies presentes en alta proporción reflejarán valores bajos de mezcla, como es de suponer al tener pocos vecinos de especies diferentes.

Cuadro III.4. Valores promedio para los índices, Mezcla de Gadow (Mi), Uniformidad de Ángulos (Wi), Dominancia (Ui) y rango medio de la prueba de Kruskal-Wallis (KW) y comparación múltiple con la prueba de Nemenyi por condición silvícola.

Condición	Índice Mi	Rango Medio de KW y Prueba de Nemenyi para Mi	Índice Wi	Rango Medio de KW y Prueba de Nemenyi para Wi	Índice Ui	Rango Medio de KW y Prueba de Nemenyi para Ui
Latizal	0.45	344c	0.50	401a	0.52	159c
Fustal joven	0.56	425b	0.51	414a	0.56	171c
Fustal medio	0.58	432b	0.54	434a	0.70	208b
Fustal viejo	0.69	514a	0.52	419a	0.83	249a

Para un análisis con mayor detalle de la mezcla espacial de los árboles, se representó gráficamente la distribución de los valores del índice Mi, para cada una de las condiciones silvícolas (Figura III.2). En la condición latizal se observa una tendencia a mantener una población menos mezclada, el 23% del arbolado tiene un valor de mezcla igual a cero, lo que significa, que estos árboles conforman grupos de cinco individuos de una misma especie y el 35% del arbolado se mezcla con tres y cuatro especies diferentes; en contraste la condición fustal viejo presenta 2% y 61% respectivamente.

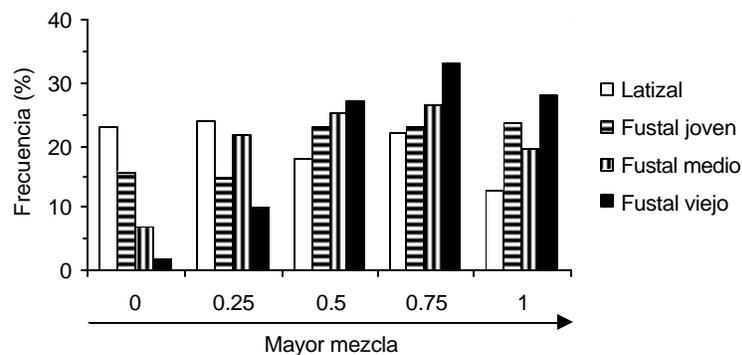


Figura III.2. Distribución del Índice Mezcla de Especies por condición silvícola.

En lo que respecta al patrón de distribución horizontal de los árboles, los valores promedio del índice W_i a nivel de condición se presentan en el Cuadro III.4. La prueba de Kruskal-Wallis indicó que no existen diferencias estadísticas entre condiciones (chi-cuadrado = 2.8608 y $p = 0.4136$), los cuatro ambientes presentaron un patrón de distribución aleatorio.

De acuerdo con Hui y Gadow (2002), el valor medio del índice W_i alrededor de 0.50, significa que el arreglo espacial horizontal de los árboles presenta un patrón general de distribución aleatorio, conforme el valor aumenta de 0.6 la distribución tiende a ser en grupos y un valor menor de 0.4 la distribución es regular, como en plantaciones jóvenes.

Los valores del índice W_i aquí reportados coinciden con otros estudios como el de Aguirre *et al.* (2003) quienes en tres bosques de coníferas excluidos del manejo forestal, definieron la distribución de los árboles como aleatoria, al determinar valores promedio para el índice W_i de 0.50, 0.52 y 0.51. Pommerening (2002) reportó en tres plantaciones adultas un patrón de distribución aleatorio, con valores W_i de 0.57, 0.53 y 0.56 respectivamente, atribuible a la mortandad, establecimiento natural de otras especies y actividades de manejo forestal.

La distribución del índice W_i para las cuatro condiciones silvícolas puede observarse en la Figura III.3, en ella se muestra una tendencia similar con pequeñas variaciones. Para las cuatro condiciones, en promedio, el porcentaje de árboles con una distribución regular fue del 21%, con distribución aleatoria 54% y con una distribución en grupos del 25%.

Al analizar la distribución espacial horizontal de los árboles solamente de pino pátula, esta se mantuvo como aleatoria en las cuatro condiciones, estadísticamente tampoco se detectaron diferencias significativas (Chi-cuadrada = 3.2440 $p > 0.3555$).

Investigaciones afines (Ishii *et al.*, 2004; Corral *et al.*, 2005) han reportado cambios en la distribución espacial horizontal de los árboles, de una distribución regular en áreas sin

aprovechamiento a una distribución en grupos en áreas bajo aprovechamiento forestal. Al respecto Neumann (2001) menciona que la distribución regular proporciona el máximo espacio y condiciones de crecimiento óptimas para cada individuo, mientras la distribución en grupos provoca pérdidas de incremento.

Los patrones de distribución han sido vinculados a diferentes procesos (como la mortalidad de árboles, la competencia, regeneración, creación de huecos, semillación, entre otros) de ser los responsables de los patrones espaciales observados (Zenner y Hibbs, 2000).

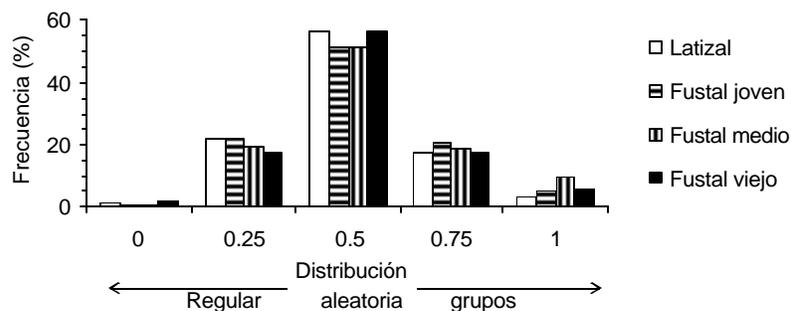


Figura III.3. Distribución del Índice de Uniformidad de Ángulos (W_i) por condición silvícola.

En lo que corresponde a la diferenciación de tamaños en diámetro para la especie pino pátula cuantificada por medio del índice U_i , la prueba de Kruskal-Wallis detectó la existencia de diferencias estadísticas significativas ($\chi^2 = 25.1586$ y $p = 0.0001$) entre las condiciones silvícolas bajo estudio. En el Cuadro III.4 se registran los valores promedio de U_i para cada condición, se observa que conforme la condición se desarrolla, la dominancia de pino pátula va en aumento.

Para las condiciones latizal y fustal joven, pino pátula es codominante, en promedio, se asocia con dos árboles más delgados y con dos más gruesos. En la condición fustal medio, pino pátula es dominante al presentarse entre dos y tres árboles circunvecinos más

delgados. En la condición fustal viejo, pino pátula es ampliamente dominante ya que al menos tres árboles de los cuatro que lo rodean son más delgados.

En la Figura III.4 se representa con mayor detalle la distribución del índice Ui en cada una de las cuatro condiciones. En la condición latizal, la distribución porcentual de pino pátula se mantuvo de una forma equilibrada, con pequeñas variaciones alrededor de 20% en cada uno de los cinco criterios de clasificación. En la condición fustal viejo, pino pátula es una especie plenamente dominante, ya que en el 29% de los árboles de referencia están rodeados de tres árboles más pequeños y el 54% de cuatro árboles más pequeños.

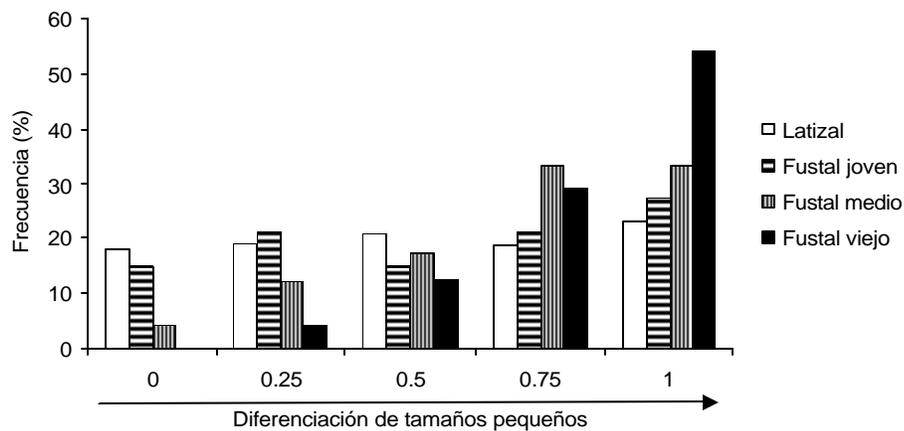


Figura III.4. Distribución del Índice de Dominancia de pino pátula por condición silvícola .

III.8. CONCLUSIONES

La cuantificación de aspectos relacionados con la estructura de los rodales es importante para entender el funcionamiento del ecosistema y con ello contribuir al manejo forestal sustentable.

Se presentaron diferencias en la diversidad de especies arbóreas según la etapa de desarrollo silvícola, en bosques maduros, del tipo fustal medio y fustal viejo, se registraron valores que indicaron mayor diversidad de árboles que en bosques inmaduros del tipo latizal y fustal joven, que mostraron menor diversidad.

Pino pátula es la especie más importante en cada una de las condiciones silvícolas, al ocupar mayor área basal, registrar el mayor número de árboles por unidad de superficie y de mayor distribución en el área de estudio.

El grado de mezcla de las especies arbóreas varió de acuerdo a la condición silvícola, éste avanzó progresivamente conforme la condición se desarrolló, en el tipo de bosque latizal se presentó la condición más pura ó el menor grado de mezcla, hasta el bosque de tipo fustal viejo donde se presentó la mayor mezcla de las especies.

El arreglo espacial horizontal de los árboles se comportó de manera similar en las cuatro condiciones silvícolas, independientemente del desarrollo de la masa, mostró un patrón general de distribución aleatorio, aunque también se registraron proporciones menores con distribución regular y en grupos.

La dominancia en diámetro (y en consecuencia en área basal) de pino pátula sobre sus vecinos más cercanos varía y crece conforme la condición silvícola se desarrolla, desde la condición latizal donde es codominante hasta la condición fustal viejo donde es plenamente dominante.

La aplicación de tratamientos silvícolas han modificado las condiciones de diversidad y estructura de rodales.

III.9. REFERENCIAS

- Aguirre C., O. A., G. Hui, K. Gadow, and J. Jiménez. 2003. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *For. Ecol. Manage.* 183: 137-145.
- 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. *Invest. Agrar: Sist Recur For* 14(2): 217-228.
- Crow, T.R., D.S. Buckley, E. A. Nauertz, and J. C. Zasada. 2002. Effects of Management on the Composition and Structure of Northern Hardwood Forests in Upper Michigan. *For. Sci.* 48 (1): 129-145.
- Del Río, M., F. Montes, I. Cañellas y G. Montero. 2003. Revisión: índices de diversidad estructural en masa forestales. *Invest. Agrar: Sist Recur For* 12(1):159-176.
- Efron, B. 1979. Bootstrap methods: another look at the jackknife. *Annals of Statistics* 7:1-16
- Franklin, J.F., T.A. Spies, R. Van Pelt, A.B. Carey, D.A. Thornburgh, D.R. Berg, D.B. Lindenmayer, M.E. Harmon, W.S. Keeton, D.C. Shaw, K. Bible and J. Chen. 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forest as an example. *For. Ecol. Manage.* 155: 399-423.
- Gadow, k. Von. 1993. Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung. *Forst und Holz* 21:601-606.
- Gadow, k. Von., and G. Hui. 1999. *Modelling Forest Development*. Kluwer Academic Publishers, 213 pp.
- Gadow, k. Von., and G. Hui. 2002. Characterising forest spatial structure and diversity. In: Bjoerk, L. (Ed). *Proceedings IUFRO Int. workshop 'Sustainable forestry in temperate regions'*. Lund, Sweden, pp 20-30.

- García-Mendoza, A., M. Ordóñez y M. Briones-Salas. (Eds). 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología-UNAM, WWF, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza. México D.F. 605 pp.
- Hunter, M.L. 1999. Maintaining biodiversity in forest ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 698 p.
- Ishii, H.T., S. Tanabe and Hiura T. 2004. Exploring the Relationships Among Canopy Structure, Stand Productivity, and Biodiversity of Temperate Forest Ecosystems. *For. Sci.* 50 (3): 342-355.
- Jiménez P., J., O. A. Aguirre C. y H. Kramer. 2001. Análisis de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México. *Invest Agrar: Sist Recur For* 10(2): 355-366.
- Kimmins, J. P. 1997. *Forest Ecology: A Foundation for Sustainable Management*. Prentice Hall, New Jersey, 596 pp.
- Kint, V., M. Van Meirvenne, L. Nachtergale, G. Geudens, and N. Lust. 2003. Spatial Methods for Quantifying Forest Stand Structure Development: A Comparison Between Nearest-Neighbor Indices and Variogram Analysis. *For. Sci.* 49 (1): 36-49.
- Lähde, E., Laiho, O., Norokorpi, Y. and Saksa T. 1999. Stand structure as the basis of diversity index. *For. Ecol. Manage.* 115: 213-220.
- Magurran, A. E. 2004. *Measuring biological diversity*. Black-well. Malden, MA. 256 p.
- Neuman, M., and F. Starlinger. 2001. The significance of different indices for stand structure and diversity in forest. *For. Ecol. Manage.* 145: 91-106.
- Pommerening, A. 2002. Approaches to quantifying forest structures. *Forestry* 75 (3): 305-324.
- Pommerening, A. and D. Stoyan. 2006. Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure. *Can. J. For. Res.* 36(7): 1723-1739.

- Solís-Moreno, R., O.A. Aguirre-Calderón, E.J. Treviño-Garza, J. Jiménez-Pérez, E. Jurado-Ybarra y J. Corral-Rivas. 2006. Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 12(2):49-64.
- Técnica Informática Aplicada. S.A. 1993. Programa de Manejo Integral Forestal de Ixtlán de Juárez 1993-2002. 290 p.
- Unidad Industrial de Explotación Forestal Fábricas de Papel Tuxtepec, S.A. 1977. Proyecto General de Ordenación. Estudio Forestal Fotogramétrico, Sección I, III y IV. Estado de Oaxaca. 167 p.
- Zar, J.H. 1999. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall. New Jersey. 929 p.
- Zenner, E. K. and D.E. Hibbs. 2000. A new method for modeling the heterogeneity of forest structure. *For. Ecol. Manage.* 129: 75-87.

CAPÍTULO IV

MODELOS DE CRECIMIENTO EN ALTURA PARA PINO PÁTULA EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO

IV.1. RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar modelos dinámicos de crecimiento en altura dominante para *Pinus patula* Schl et Cham., aplicable en la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. El análisis del crecimiento en altura dominante se realizó bajo la suscripción de dos modelos base, Chapman-Richards y Hossfeld IV, a partir de los cuales se derivaron cuatro ecuaciones dinámicas de crecimiento, tres de ellas se generaron con la metodología de diferencia algebraica y una ecuación a través de la diferencia algebraica generalizada, todas fueron ajustadas a través de modelos de efectos mixtos no lineales. Las cuatro ecuaciones dinámicas se aplicaron en tres condiciones de suelo, siempre el mejor ajuste estadístico lo ofreció la estructura polimórfica de Chapman-Richards.

Palabras clave: Chapman-Richards, ecuaciones dinámicas, Hossfeld, *Pinus patula* Schl et Cham.

IV.2. ABSTRACT

HEIGHT GROWTH MODELS FOR PINUS PATULA IN IXTLAN DE JUAREZ, OAXACA, MEXICO

The main objective of this study was to evaluate the dynamic dominant height growth models for *Pinus patula* Schl et Cham, applicable in the region of Ixtlan of Juarez, Oaxaca, Mexico. The growth analysis for dominant height was realized under the subscription of two base model Chapman-Richards and Hossfeld IV, from which four dynamic growth equations were derived, three of them were generated with the methodology of algebraic difference and an equation through the generalized algebraic difference; all were adjusted through models of not lineal effects. The four dynamic equations applied in three soils conditions; the polymorphic structure of Chapman-Richards always had the best statistical adjustment.

Key words: Chapman-Richards, Dynamic equations, Hossfeld, *Pinus patula* Schl et Cham.

IV.3. INTRODUCCIÓN

En la región de Ixtlán de Juárez, en el estado de Oaxaca, México, los ecosistemas forestales son de gran importancia ecológica, económica y social. Las actividades relacionadas con el manejo forestal de bosques de pino-encino son las principales generadoras de recursos económicos para la población local.

La especie más importante en el área de estudio es pino pátula (*Pinus patula* Schl et Cham.), debido a su mayor distribución, mayor abundancia y mayor posibilidad de volumen de corte.

El manejo forestal eficiente exige la zonificación del potencial de los suelos para orientar a los tomadores de decisiones sobre las labores silvícolas y de manejo, en la definición los niveles de producción sostenible que es posible alcanzar.

A la capacidad potencial de producción de madera de un sitio para una especie en particular se le ha definido como calidad de sitio, y la metodología comúnmente utilizada para evaluar la productividad del sitio, con base en relaciones altura dominante-edad, de rodales coetáneos y generalmente puros, es la que se conoce como índice de sitio (Clutter *et al.*, 1983).

El índice de sitio se fundamenta en el supuesto que el desarrollo en altura de árboles dominantes en rodales coetáneos, no es afectado considerablemente por la densidad del rodal. La idea básica de índice de sitio es simple, los rodales en los mejores sitios están dispuestos para seguir trayectorias de altura-edad más altas que esos que están en sitios pobres.

No obstante que los aprovechamientos comerciales en la Sierra Norte de Oaxaca, dentro de la cual se ubica Ixtlán de Juárez, se iniciaron hace aproximadamente 52 años, y que probablemente el trabajo pionero en México sobre calidad de sitio, fue el que se realizó precisamente en la Sierra Norte de Oaxaca (Castaños, 1962), hasta la fecha, la mayoría de

los métodos que se utilizan para clasificar la productividad de los terrenos forestales son de forma gráfica y superficial, lo que crea cierta duda en la confiabilidad con la que se representa la calidad de sitio.

IV.4. HIPÓTESIS

Existen diferencias significativas en la predicción del crecimiento en altura dominante de pino pátula dependiendo del tipo de ecuación dinámica que se utilice.

IV.5. OBJETIVO

Evaluar modelos dinámicos que permitan llevar a cabo estimaciones más precisas de la altura dominante promedio en rodales de *Pinus patula* Schl et Cham., aplicable en la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

IV.6. ANTECEDENTES

A través de los años las metodologías para estimar la calidad de sitio han ido evolucionando con la finalidad de hacer estimaciones más confiables, algunas de las revisiones al respecto han sido publicadas por Spurr (1952), Jones (1969), Carmean (1975), Hägglund (1981), Clutter *et al.* (1983), Ortega y Montero (1988), Grey (1989).

Las metodologías más recientes y las formas más avanzadas de integrar ecuaciones básicas de predicción de la altura como una función de la edad y del sitio, son las denominadas ecuaciones dinámicas que se fundamentan en el concepto de edad base invariante.

Bailey y Clutter (1974) formalizaron el concepto de invarianza de la edad base como una propiedad de las curvas de índice de sitio. Invarianza se define como, “una propiedad o cantidad que no cambia por una o más operaciones específicas o transformaciones” (Cieszewski y Bailey, 2000).

Debido a que la edad base es arbitraria, sería indeseable para un modelo producir diferentes resultados al utilizar diferentes edades base (García, 2004). En ecuaciones de altura con edad base invariante, los “invariantes” son las alturas calculadas y como un resultado, las formas de las curvas de altura sobre edad; los elementos variables son la edad base y las alturas de referencia.

Bailey y Clutter (1974) a partir de la propiedad de invarianza, presentaron un método para derivar modelos de edad base invariante, el cual es conocido como el Método de la Diferencia Algebraica (ADA). El procedimiento es flexible y puede ser aplicado para producir familias de curvas anamórficas o polimórficas.

El método ADA para derivar una función explícita del modelo de índice de sitio con edad base invariante incluye los siguientes pasos: identificación de una ecuación base

adecuada que describa una curva de altura sobre edad de la forma implícita $H = f(A)$; identificación de un parámetro en una ecuación base de la curva que se presume ser específico del sitio; solucionar la ecuación base para el parámetro específico del sitio y sustituir todos los términos (H, A) por las variables de la condición inicial (H_0 , A_0); substituir el parámetro específico del sitio con su solución en la ecuación base.

Cieszewski y Bailey (2000) propusieron una extensión al método ADA llamado Método de la Diferencia Algebraica Generalizada (GADA), la principal adición de este método es que permite más de un parámetro en una ecuación base para ser específico del sitio y además es capaz de combinar las propiedades de dos ecuaciones dinámicas diferentes en una ecuación dinámica a través de la suma de sus formas explícitas de la ecuación.

La metodología GADA (Cieszewski y Bailey, 2000) puede ser resumida en los siguientes cinco puntos: seleccionar un modelo base adecuado que describa una curva de altura sobre la edad; identificar en la ecuación base todos los parámetros que potencialmente cambian con diferentes niveles de productividad del sitio, reformular la ecuación base sustituyendo esos parámetros como funciones de X y nuevos parámetros globales; solucionar el modelo resultante formulado con GADA; formular una solución específica para X en términos de condiciones iniciales (R_0) lo cual es hecho por la sustitución uno a uno de H y A; substituir R_0 , coleccionar los términos, simplificar tanto como sea posible, y producir el modelo final de índice de sitio basado en GADA con BAI

Las metodologías de diferencia algebraica han evolucionado en modelos de crecimiento de efectos mixtos a través de reconocer que los parámetros específicos del sitio son considerados más apropiadamente como variables aleatorias debido a su correspondencia con sitios que pueden ser seleccionados de forma aleatoria o representativos de otra forma.

Los modelos de efectos mixtos son una herramienta estadística de gran utilidad para el análisis de datos de medidas repetidas sobre los mismos elementos de observación bajo condiciones que varían a lo largo del tiempo, denominados análisis de datos agrupados (Pinheiro y Bates, 2000).

La utilización de los modelos de efectos mixtos se justifica por la flexibilidad que ellos ofrecen en el modelaje al utilizar con frecuencia datos correlacionados y por la manipulación de datos balanceados y desbalanceados en una estructura uniforme (Pinheiro y Bates, 2000).

Los modelos de efectos mixtos incluyen parámetros de regresión fijos (efectos fijos) que describen la forma de la curva típica de crecimiento sobre la población entera y coeficientes de regresión aleatorios (efectos aleatorios) que individualiza la curva para el sitio específico, árbol específico o alguna otra característica específica del patrón de crecimiento (Hall y Bailey, 2001).

Los parámetros globales son comunes a todos los rodales o parcelas muestreadas, mientras que los parámetros locales varían de lugar a lugar, son dependientes del sitio y específico de cada rodal; en la función altura-edad de Richards: $H = a[1 - \exp(-bt)]^c$, una versión polimórfica podría tener b como parámetro local, mientras que a y c como parámetros globales (García, 2004).

Los modelos mixtos son usados principalmente para describir la relación entre una variable respuesta y algunas covariables en datos agrupados de acuerdo a uno o más factores de clasificación, la idea conceptual de estos modelos es que cada individuo o unidad experimental tenga su propia línea de regresión y que los parámetros poblacionales sean el promedio de los coeficientes individuales.

Para modelar adecuadamente el crecimiento en altura dominante a través de un modelo de efectos mixtos no lineal, se requiere una cuidadosa identificación de las fuentes

de variación de los datos, con lo cual se logran mejores valores estimados de los efectos fijos, que describen el comportamiento global de los modelos y de estimaciones específicas del sitio (De los Santos *et al.*, 2006).

Existen diferentes notaciones para representar un modelo de efectos mixtos, sin embargo, la representación más usada es la que se presenta enseguida:

$$Y_i = X_i B + Z_i b_i + e_i \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Donde:

Y_i = vector n_i -dimensional de la variable respuesta

X_i = vector p -dimensional de efectos fijos

b_i = vector q -dimensional de efectos aleatorios

X_i = matriz de regresión de efectos fijos (de medida $n_i \times p$)

Z_i = matriz de regresión de efectos aleatorios (de medida $n_i \times q$)

Bajos los siguientes supuestos: $\tilde{e}_i \sim N(0, \sigma^2)$, $b_i \sim N(0, \Sigma)$

IV.7. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.7.1. Área de estudio

El estudio se realizó en rodales de pino-encino con dominancia de pino pátula (*Pinus patula* Schl. et Cham), en el predio de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, entre los 17°18' 16" y 17° 34' 00" latitud norte; 96° 31' 38" y 96° 20' 00" longitud oeste.

En la región citada, el pino pátula se distribuye principalmente en un rango altitudinal entre 2000 y 2500 metros, bajo un clima templado húmedo y subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura promedio anual de 20 °C y una precipitación promedio anual de 1100 mm.

IV.7.2. Base de datos

Los datos utilizados en este estudio provienen de análisis troncales efectuados en 57 árboles dominantes de pino pátula, procedentes de 44 sitios de muestreo, la determinación de la edad en cada altura de la sección del fuste se realizó siguiendo la metodología de Kiessling (1978).

Se consideró como edad total aquella que se registró a la altura del tocón (0.30 m). Los 57 árboles produjeron un total de 618 observaciones, mismas que agrupadas por individuo se pueden observar en la Figura 1a.

En cada sitio de muestreo se midió la profundidad del suelo en el horizonte "A", criterio con el cual se definieron dos grupos, los suelos delgados menores a 10 cm y los suelos profundos mayores a 10 cm. Para resaltar el posible efecto del tipo de suelo, los datos se graficaron por tipo de suelo (Figuras 1b y 1c).

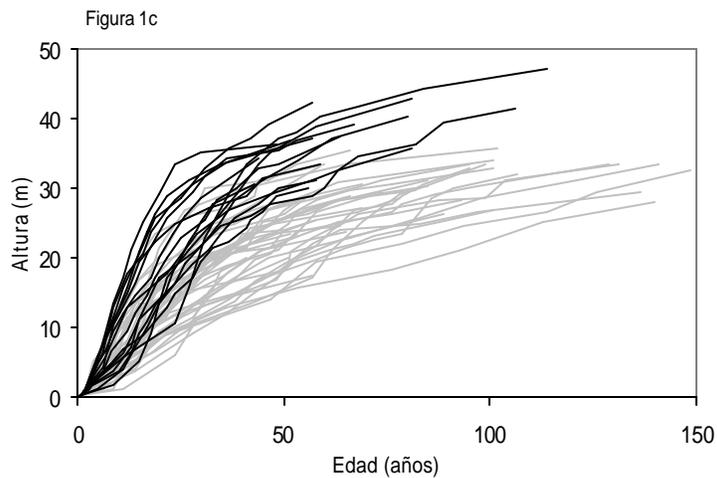
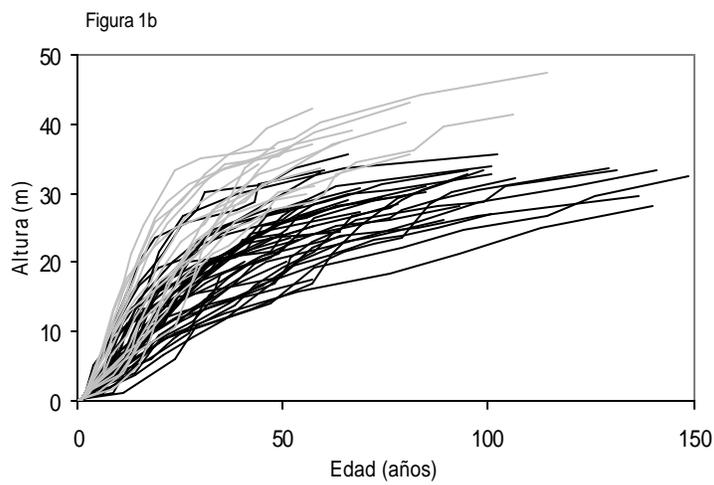
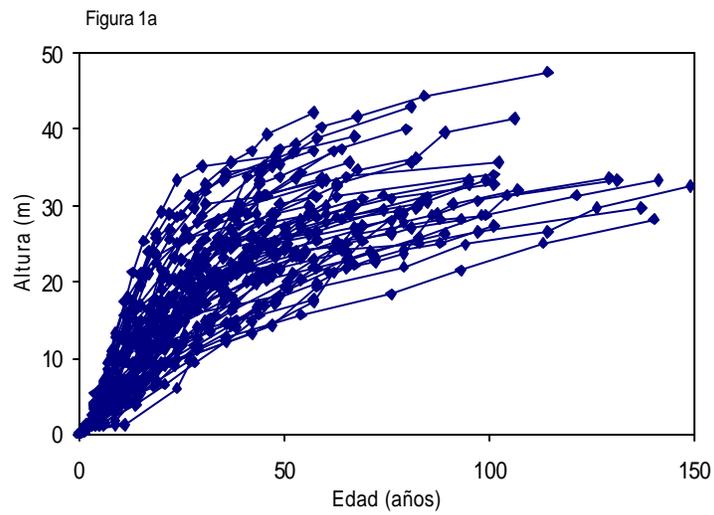


Figura IV.1.a. Datos de altura-edad para el total de árboles; 1b. datos de altura-edad para árboles ubicados en suelos delgados; 1c. datos de altura-edad para árboles ubicados en suelos profundos.

Al observar los datos de las gráficas se puede apreciar que, cada tipo de suelo representa un patrón de crecimiento diferente cuando se visualizan como series de crecimiento. En los suelos delgados, las alturas de los árboles tienden a ser menores comparadas con las alturas de los árboles ubicados en suelos profundos, a una edad de referencia.

La estructura de los datos en el suelo delgado (Figura 1b) sugiere que una familia de curvas de tipo polimórfico puede ser una opción adecuada. De igual manera los datos del suelo profundo (Figura 1c) describen una estructura más afín a las curvas de tipo polimórfico.

Los análisis del crecimiento en altura se efectuaron bajo dos argumentos, de forma general sin considerar el tipo de suelo y bajo la consideración del tipo de suelo.

IV.7.3. Modelos de crecimiento en altura dominante

Se utilizaron dos modelos base, el modelo de Chapman-Richards y el Modelo de Hossfeld tipo IV (Kiviste *et al.*, 2002), ambos modelos son de los más documentados en la literatura forestal (Amaro *et al.*, 1998; Cieszewski, 2001; Corral *et al.*, 2004).

$$\text{Modelo base de Chapman-Richards: } H(A; \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{g}) = \mathbf{a} (1 - e^{-bA})^g \quad (1)$$

$$\text{Modelo base de Hossfeld tipo IV: } H(A; \mathbf{q}, \mathbf{w}, \mathbf{d}) = \mathbf{q} (1 - we^{-t})^1 \quad (2)$$

Donde, H es la altura dominante promedio a la edad A en años; a , β , g son los parámetros a estimar en el modelo de Chapman-Richards; q , w , d son los parámetros a estimar en el modelo de Hossfeld; $t = d \times \ln(A)$; y e es la función exponencial.

Ecuaciones dinámicas.

A partir de los modelos generales de Chapman-Richards y Hossfeld, se derivaron cuatro ecuaciones dinámicas de crecimiento en altura (Cuadro 1), tres de ellas se

generaron con la metodología de Diferencia Algebraica (DA) y una ecuación se derivó usando la metodología de Diferencia Algebraica Generalizada, DAG, (Cieszewski, 2001).

Las ecuaciones del Cuadro IV.1 están diseñadas para que las predicciones de altura dominante sean invariantes respecto a la edad base y el índice de sitio.

Cuadro IV.1. Ecuaciones dinámicas utilizadas para predecir altura dominante.

Nombre	Forma	Tipo	Fuente
CHR-i	$H(A, A_0, H_0) = H_0 \frac{\alpha \left(1 - e^{-bA}\right)^{\frac{1}{\beta}}}{\alpha \left(1 - e^{-bA_0}\right)^{\frac{1}{\beta}}}$	Chapman-Richards Anamórfica (DA)	Fang y Bailey (2001)
CHR-iii	$H(A, A_0, H_0) = a \left(1 - \frac{e^{-\hat{e}A}}{\hat{e}} - \frac{\alpha H_0 \hat{e}^{-\frac{1}{\beta}}}{\hat{e} a} \frac{A}{A_0}\right)^{\frac{1}{\beta}}$	Chapman-Richards Polimórfica (DA)	Amaro <i>et al.</i> (1998)
A-i	$H(t, t_0, H_0) = H_0 \frac{1 + we^{-t_0}}{1 + we^{-t}}$	Hossfeld Anamórfica (DA)	Cieszewski (2001)
G-ii	$H(t, t_0, H_0) = \frac{1}{2} \frac{(H_0 + R)^2}{H_0 + R + 2e^w e^{-t}}$ donde $R = \sqrt{H_0^2 + 4H_0 e^w e^{-t_0}}$	Hossfeld Polimórfica (DAG)	Cieszewski (2003)

H es la altura dominante; H_0 es la altura dominante de referencia a la edad A_0 ; A es la edad en años; α, β, γ son los parámetros a estimar en el modelo de Chapman-Richards; $\hat{e}, \hat{a}, \hat{d}$ son los parámetros a estimar en el modelo de Hossfeld; e es la función exponencial; $t = dx \ln(A)$; $t_0 = dx \ln(A_0)$;

Ecuaciones bajo la formulación de efectos mixtos.

Los modelos del Cuadro IV.1 se reformularon bajo el enfoque de modelos de efectos mixtos no lineales (Cuadro IV. 2), con lo cual se contrarresta el efecto de autocorrelación debido a las observaciones efectuadas en las mismas unidades experimentales y se describe de una forma más adecuada el patrón de crecimiento.

Cuadro IV. 2. Modelos bajo la formulación de efectos mixtos.

Nombre	Forma
CHR-i	$H(\hat{H}_0, \hat{b}, \hat{g}) = (\hat{H}_0 + a_i) \frac{\hat{g} \left(1 - e^{-\hat{b} A_{ij}} \right)^{\hat{g}}}{\hat{g} \left(1 - e^{-\hat{b} A_0} \right)^{\hat{g}}} + e_{ij}$
CHR-iii	$H(\hat{H}_0, \hat{a}, \hat{g}) = \hat{a} \left(1 - \frac{\hat{g} \left(1 - e^{-\hat{b} A_{ij}} \right)^{\hat{g}}}{\hat{g} \left(1 - e^{-\hat{b} A_0} \right)^{\hat{g}}} \right) + e_{ij}$
A-i	$H(\hat{H}_0, \hat{w}, \hat{d}) = (\hat{H}_0 + a_i) \frac{\hat{e} \left(1 + \hat{w} e^{-t_0} \right)^{\hat{u}}}{\hat{e} \left(1 + \hat{w} e^{-t} \right)^{\hat{u}}} + e_{ij}$ <p>donde $t = \hat{d} \ln(A_{ij})$ y $t_0 = \hat{d} \ln(A_0)$</p>
G-ii	$H(\hat{H}_0, \hat{w}, \hat{d}) = \frac{1}{2} \frac{(\hat{H}_0 + a_i + R)^2}{(\hat{H}_0 + a_i) + R + 2 \exp(\hat{w}) e^{-t}} + e_{ij}$ $R = \sqrt{(\hat{H}_0 + a_i)^2 + 4(\hat{H}_0 + a_i) \exp(\hat{w}) e^{-t_0}}$ <p>$t = \hat{d} \ln(A_{ij})$ y $t_0 = \hat{d} \ln(A_0)$</p>

\hat{H}_0 es el parámetro que describe el promedio inicial estimado de H_0 ; \hat{b}, \hat{g} son los parámetros globales del modelo y solo incluyen efectos fijos; a_i es el parámetro específico del árbol $_i$; e_{ij} error aleatorio

Estimación de parámetros en modelos de efectos mixtos.

Una vez especificados los modelos de efectos mixtos no lineales y debido a que se tienen relativamente pocas observaciones, el ajuste se realizó bajo el criterio de Máxima Verosimilitud Restringida (MVR) y con ello compensar posibles pérdidas en grados de libertad.

El método de máxima verosimilitud indica que se escogerá como valor estimado del parámetro aquel que tiene mayor probabilidad de ocurrir según lo que hemos observado, es

decir aquel que es más compatible con los datos observados, siempre suponiendo que es correcto el modelo matemático postulado.

Añadiendo más términos, más variables, a un modelo la función de verosimilitud mejorará y si la muestra es grande será difícil distinguir mediante el contraste del cociente de verosimilitud entre una mejora "real" y una aportación trivial. El modelo perfecto no existe, puesto que todos constituyen simplificaciones de la realidad y siempre son preferibles modelos con menos variables, puesto que además de ser más sencillos, son más estables y menos sometidos a sesgo. Por ello se han propuesto otras medidas de contraste entre modelos que penalizan en alguna medida que éstos tengan muchos parámetros. Las más conocidas son el Criterio de Información de Akaike (CIA) y el Criterio de Información Bayesiano (CIB).

$$\text{CIA} = -2 (\ln \text{verosimilitud} - n^{\circ} \text{parámetros})$$

$$\text{CIB} = G - \text{gl.} \ln N$$

donde G es el cociente de verosimilitud, gl son los grados de libertad y N el tamaño de la muestra.

IV.8. RESULTADOS

IV.8. 1. Selección de modelos sin considerar el tipo de suelo

Uno de los criterios considerados para el ajuste total del modelo fue el logaritmo de máxima verosimilitud restringida (log-MVR), el cual sugiere que la estructura Chapman Richards de tipo polimórfico (CHR-iii) produce el mejor comportamiento entre los modelos de prueba al presentar el valor más cercano a cero (Cuadro IV. 3).

Debido a que la comparación entre modelos presentan estructuras diferentes, se tomaron en cuenta criterios que compensan por las diferencias en los grados de libertad. Por esta razón también se calcularon, el Criterio de Información de Akaike (CIA) y el Criterio de Información Bayesiano (CIB), dentro de la misma condición.

El argumento de selección de los modelos fue escoger aquellos con valores más bajos en CIA y CIB. La utilización de estos criterios sugieren que los modelos polimórficos fueron los que mostraron mejores ajustes para los datos de edad-altura.

Cuadro IV.3. Bondad de ajuste de los modelos de efectos mixtos a los datos de edad-altura para el total de árboles.

Modelo	Familia	Tipo	Grados de Libertad	CIA	CIB	Log-MVR	Rank
CHR-iii	Chapman-Richard	Polimórfico (DA)	4	3523	3546	-1756	1
G-ii	Hossfeld	Polimórfico (DAG)	4	3564	3587	-1777	2
A-i	Hossfeld	Anamórfico (DA)	4	3676	3699	-1833	3
CHR-i	Chapman-Richard	Anamórfico (DA)	4	3712	3735	-1851	4

Para el caso de todos los árboles en general, es decir sin considerar el tipo de suelo, el mejor ajuste se obtuvo con el modelo Chapman Richards tipo polimórfico; con valores

muy similares se presenta el modelo Hossfeld tipo DAG polimórfico (Cuadro IV.3). Los modelos anamórficos o con múltiples asíntotas son los más débiles en el ajuste.

Los valores de los parámetros fijos y aleatorios en cada uno de los modelos se presentan en el Cuadro IV.4, donde se puede observar que todos los parámetros de efectos fijos incluidos son estadísticamente significativos. Para los cuatro tipos de estructuras H_0 es considerado como el parámetro mixto del modelo ya que agrupa un efecto global y los efectos debidos a la estructura de la muestra de los datos y para el caso del modelo CHR-iii, el parámetro a representa el valor del techo posible para la versión polimórfica.

Cuadro IV.4. Valores de los parámetros estimados para los efectos fijos e intervalos de confianza al 95% para los efectos aleatorios, de modelos bajo prueba para el total de árboles.

Modelo	Parámetro	Estimado	Error estándar	T-calculada	Pr> t
CHR-iii	H_0	26.772	0.827	32.346	<0.0001
	a	40.374	0.610	66.161	<0.0001
	?	1.178	0.031	37.534	<0.0001
G-ii	H_0	39.099	1.163	33.613	<0.0001
	?	8.397	0.054	153.592	<0.0001
	d	1.263	0.032	38.409	<0.0001
A-i	H_0	40.373	1.495	26.988	<0.0001
	?	4.356	0.061	70.906	<0.0001
	d	-1.163	0.033	-35.231	<0.0001
CHR-i	H_0	38.621	1.442	26.782	<0.0001
	β	0.023	0.001	16.022	<0.0001
	?	1.042	0.031	33.512	<0.0001
Modelo	Parámetro	Inferior	Estimado	Superior	
CHR-iii	H_0	5.130	6.196	7.483	
G-ii	H_0	6.419	7.777	9.423	
A-i	H_0	8.378	10.171	12.347	
CHR-i	H_0	8.006	9.725	11.813	

Con los valores de los parámetros se puede disponer de las gráficas correspondientes a cada uno de los modelos, para el caso del modelo Chapman Richards tipo polimórfico se presentan las curvas de índice de sitio sobre el total de datos observados (Figura IV. 2).

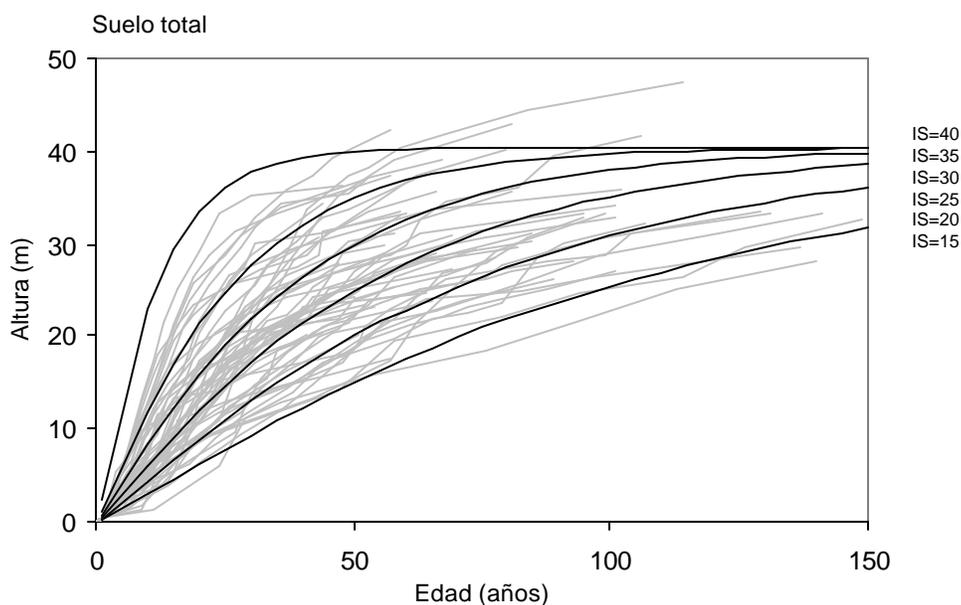


Figura IV.2. Curvas polimórficas de índice de sitio con una edad de referencia de 50 años para el total de datos a través del modelo de Chapman-Richards.

IV.8. 2. Selección de modelos para suelos delgados

Los modelos bajo prueba en la condición de suelos delgados, siguieron un comportamiento similar a la condición anterior donde no se consideró el tipo de suelo. El mejor ajuste se obtuvo con el modelo Chapman Richards tipo polimórfico (Cuadro IV.5).

Cuadro IV.5. Bondad de ajuste de los modelos de efectos mixtos a los datos de edad-altura de árboles ubicados en suelos delgados.

Modelo	Familia	Tipo	Grados de Libertad	CIA	CIB	Log-VR	Rank
CHR-iii	Chapman-Richard	Polimórfico (DA)	4	2140	2162	-1065	1
G-ii	Hossfeld	Polimórfico (DAG)	4	2296	2317	-1143	2
A-i	Hossfeld	Anamórfico (DA)	4	2380	2401	-1185	3
CHR-i	Chapman-Richard	Anamórfico (DA)	4	2408	2429	-1199	4

Los valores de los parámetros fijos y aleatorios para cada uno de los modelos para datos de edad altura de árboles ubicados en suelos delgados se presentan en el Cuadro IV.6., en él se puede observar que todos los parámetros de efectos fijos incluidos son estadísticamente significativos.

Cuadro IV.6. Valores de los parámetros estimados para los efectos fijos e intervalos de confianza al 95% para los efectos aleatorios de modelos bajo prueba, en la condición de suelos delgados.

Modelo	Parámetro	Estimado	Error estándar	T-calculada	Pr> t
CHR-iii	H_0	23.945	0.6869	34.858	<0.0001
	a	34.783	0.4899	70.991	<0.0001
	?	1.192	0.0328	36.324	<0.0001
G-ii	H_0	36.139	1.008	35.826	<0.0001
	?	8.224	0.055	148.041	<0.0001
	d	1.167	0.034	33.853	<0.0001
A-i	H_0	37.341	1.262	29.570	<0.0001
	?	4.272	0.061	69.376	<0.0001
	d	-1.079	0.035	-30.799	<0.0001
CHR-i	H_0	35.989	1.230	29.257	<0.0001
	β	0.019	0.0014	12.882	<0.0001
	?	0.962	0.0313	30.754	<0.0001
Modelo	Parámetro	Inferior	Estimado	Superior	
CHR-iii	H_0	3.484	4.358	5.450	
G-ii	H_0	4.365	5.491	6.907	
A-i	H_0	5.530	6.972	8.790	
CHR-i	H_0	5.330	6.725	8.485	

Con los valores de los parámetros del modelo Chapman-Richards de tipo polimórfico, se generaron curvas de índice de sitio (Figura IV.3.) para la condición de suelos delgados.

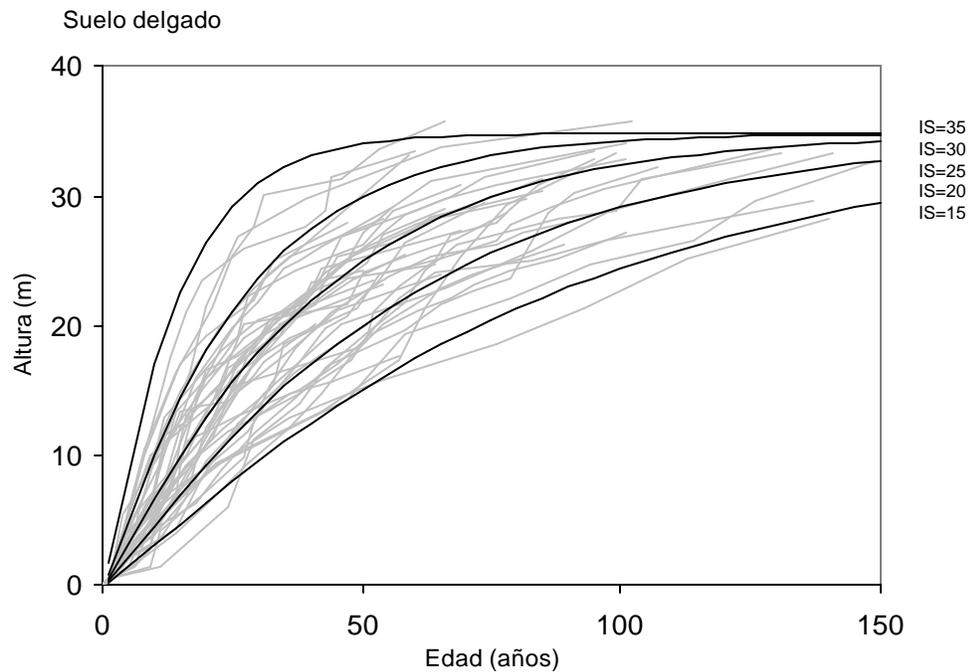


Figura IV.3. Curvas polimórficas de índice de sitio con una edad de referencia de 50 años para suelos delgados a través del modelo de Chapman-Richards

IV.8. 3. Selección de modelos para suelos profundos

El ajuste de los modelos para datos de edad altura de árboles ubicados en suelos profundos, siguió un comportamiento similar a la condición de suelos delgados. Nuevamente el mejor ajuste se obtuvo con el modelo Chapman Richards tipo polimórfico (Cuadro IV.7).

Cuadro IV.7. Bondad de ajuste de los modelos de efectos mixtos a los datos de edad-altura de árboles ubicados en suelos profundos.

Modelo	Familia	Tipo	Grados de Libertad	CIA	CIB	Log-VR	Rank
CHR-iii	Chapman-Richard	Polimórfico (DA)	4	1086	1103	-538	1
G-ii	Hossfeld	Polimórfico (DAG)	4	1173	1190	-581	2
A-i	Hossfeld	Anamórfico (DA)	4	1206	1223	-598	3
CHR-i	Chapman-Richard	Anamórfico (DA)	4	1220	1237	-605	4

Los valores de los parámetros fijos y aleatorios para cada uno de los modelos para datos de edad altura de árboles ubicados en suelos profundos se presentan en el Cuadro IV.8., en él se puede observar que todos los parámetros de efectos fijos incluidos son estadísticamente significativos.

Cuadro IV.8. Valores de los parámetros estimados para los efectos fijos e intervalos de confianza al 95% para los efectos aleatorios de modelos bajo prueba, en la condición de suelos profundos.

Modelo	Parámetro	Estimado	Error estándar	T-calculada	Pr> t
CHR-iii	H_0	34.681	0.922	37.605	<0.0001
	a	40.603	0.646	62.807	<0.0001
	?	1.745	0.093	18.697	<0.0001
G-ii	H_0	46.775	1.998	23.404	<0.0001
	?	8.657	0.121	71.239	<0.0001
	d	1.394	0.069	20.039	<0.0001
A-i	H_0	48.266	2.508	19.240	<0.0001
	?	4.533	0.142	31.788	<0.0001
	d	-1.303	0.071	-18.227	<0.0001
CHR-i	H_0	45.281	2.352	19.245	<0.0001
	β	0.032	0.003	9.393	<0.0001
	?	1.198	0.075	15.922	<0.0001
Modelo	Parámetro	Inferior	Estimado	Superior	
CHR-iii	H_0	2.441	3.562	5.196	
G-ii	H_0	4.081	5.947	8.666	
A-i	H_0	5.255	7.725	11.356	
CHR-i	H_0	4.906	7.219	10.621	

Con los valores de los parámetros del modelo Chapman-Richards de tipo polimórfico, se generaron curvas de índice de sitio (Figura IV.4.) para la condición de suelos profundos.

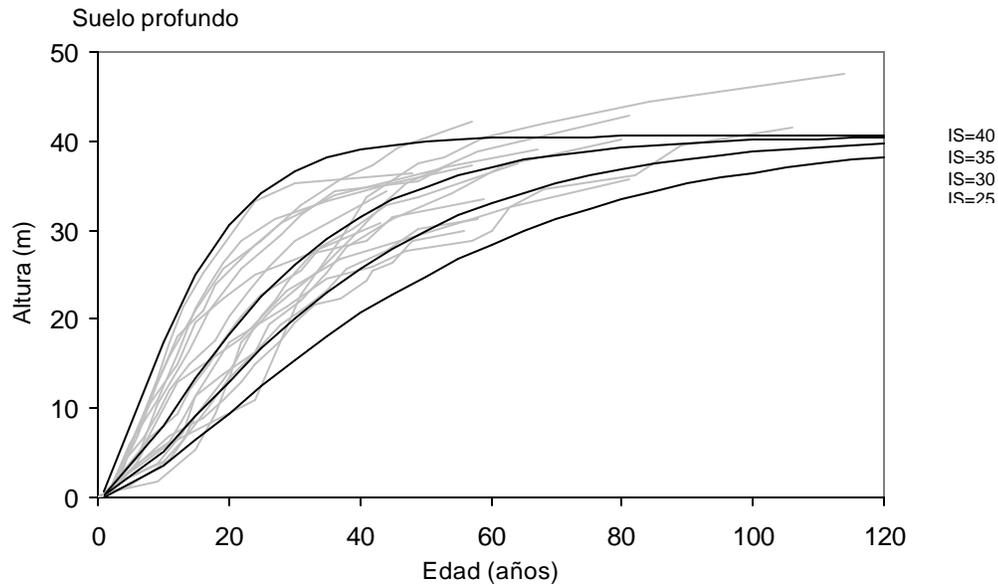


Figura IV.4. Curvas polimórficas de índice de sitio con una edad de referencia de 50 años para suelos profundos a través del modelo de Chapman-Richards

Con la finalidad de comparar las alturas estimadas entre las tres diferentes condiciones de suelo con el modelo de Chapman-Richards polimórfico, se elaboró de forma complementaria a las figuras anteriores, el Cuadro IV.9.

Se puede observar que antes de los 50 años, el suelo profundo presenta valores de alturas menores que la condición de suelo delgado y que la condición donde no se consideró el suelo. Sin embargo, después de los 50 años, las diferencias en crecimiento en altura de los árboles que se ubican en la condición de suelo profundo son mayores, sobre todo al compararse con la condición de suelo delgado.

Cuadro IV.9. Índice de sitio a una edad de referencia de 50 años para las tres condiciones de suelo a través del modelo de Chapman-Richards polimórfico.

Edad (años)	Sin considerar tipo de suelo			Suelo profundo			Suelo delgado		
	IS=20	IS=25	IS=30	IS=20	IS=25	IS=30	IS=20	IS=25	IS=30
10	4.3	5.9	8.2	2.4	3.5	5.2	4.5	6.6	9.9
20	8.8	11.9	15.8	6.7	9.4	13.0	9.2	12.8	18.0
30	13.0	17.1	21.8	11.4	15.3	20.1	13.4	17.9	23.7
40	16.7	21.4	26.5	15.9	20.6	25.7	17.0	21.9	27.5
50	20.0	25.0	30.0	20.0	25.0	30.0	20.0	25.0	30.0
60	22.9	27.9	32.6	23.6	28.5	33.1	22.6	27.4	31.7
70	25.4	30.3	34.6	26.6	31.4	35.3	24.7	29.2	32.7
80	27.5	32.3	36.1	29.2	33.5	36.9	26.5	30.5	33.5
90	29.4	33.8	37.2	31.3	35.2	38.0	27.9	31.6	33.9
100	31.0	35.1	38.0	33.1	36.5	38.8	29.1	32.4	34.2

IV.9. CONCLUSIONES

El modelo Chapman-Richards de tipo polimórfico presentó las mejores condiciones de ajuste estadístico y un comportamiento lógico cuando las curvas de proyección se comparan con los datos.

La profundidad del suelo en el horizonte A influye de manera significativa en el crecimiento en altura dominante que alcanza pino pátula a una edad base invariante.

IV.10. REFERENCIAS

- Amaro, A., D. Reed, M. Tomé and I. Themido. 1998. Modeling Dominant Height Growth: Eucalyptus Plantations in Portugal. *For. Sci.* 44 (1): 37-46.
- Bailey, R. L., and J. L. Clutter. 1974. Base age invariant polymorphic site curves. *For. Sci.* 51: 345-355.
- Carmean, W. H. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. In: Brady, N. C. (Ed). *Advances in Agronomy*. 27: 209–269. Academic Press, New York.
- Castaños M., L. J. 1962. Evaluación de la calidad de estación de *Pinus patula* en el norte de Oaxaca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México. Boletín Técnico No 2. 32 pp.
- Cieszewski, C. J. 2001. Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. *Can. J. For. Res.* 31(1): 165-173.
- Cieszewski, C. J. 2002. Comparing fixed- and variable-base-age site equations having single versus multiple asymptotes. *For. Sci.* 48(1):7-23
- Cieszewski, C. J. 2003. Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV function $Y^3 = ax^m/(c+x^{m-1})$, a simplified mixed model and scant subalpine fir data. *For. Sci.* 49(4):539-554.
- Cieszewski, C.J. and R.L. Bailey. 2000. Generalized Algebraic Difference Approach: Theory Based Derivation of Dynamic Site Equations with Polymorphism and Variable Asymptotes. *For. Sci.* 46(1):116-126
- Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. Peinar, G. H. Brister and R. L. Bailey, 1982. *Timber Management: a quantitative approach*. John Wiley. New York. 333 p.
- Corral Rivas, J. J., J. G. Álvarez González, A. D. Ruíz González and K. von Gadow. 2004. Compatible height and site index models for five pine species in El Salto, Durango (Mexico). *For. Ecol. Manage.* 201:145-160.

- De los Santos-Posadas, H. M., M. Montero-Mata y M. Kanninen. 2006. Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en Costa Rica. *Agrociencia* 40 (4): 521-532.
- Fang, Z., and R. L. Bailey. 2001. Nonlinear mixed effects modeling for slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. *For. Sci.* 47(3):287-300
- García, O. 2004. Site Index: Concepts and Methods. In: Cieszewski C.J. and Strub M. (Eds). *Second International Conference on Forest Measurements and Quantitative Methods and Management*. Hot Springs, Arkansas USA. pp 275-283.
- Grey, D. C. 1989. Site index-A review. *South African Forestry Journal* (148):28–32.
- Hägglund, B. 1981. Evaluation of forest site productivity. *Forestry Abstracts*, 42:515–527.
- Hall, D. B. and R. L. Bailey. 2001. Modeling and prediction of forest growth variables based on multilevel nonlinear mixed models. *For. Sci.* 47 (3):311-321.
- Jones, J. R. 1969. Review and comparison of site evaluation methods. *Research Paper RM-51*, USDA Forest Service. 27 p.
- Kiessling D., F. J. 1978. Análisis troncales, ejecución, aplicación actual y perspectivas. En: *La Investigación Forestal en las Unidades Forestales y Organismos Descentralizados*. Primera Reunión. Pub.Esp. No. 15. INIF. México. pp: 9-54.
- Kiviste, A., J.G. Álvarez-González, A. Rojo-Alboreca y A. D. Ruíz-González. 2002. *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Monografías INIA: Forestal No. 4. Madrid, España. 190 p.
- Krumland, B., and H. Eng. 2005. Site index systems for major young-growth forest and woodland species in northern California. *California Forestry Report No.4*
- Ortega, A. y G. Montero. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. *Revisión bibliográfica. Ecología*, 2:151–184.

- Pinheiro, C. J., and D. M. Bates. 2000. Mixed-effects models in S and S-plus. Springer-Verlag, New York, Inc. 528 p.
- Spurr, S. H. 1952. Forest Inventory. Ronald Press, New York. 476 p.
- Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. For. Sci. 39 (3):594-616.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES

En los bosques de pino-encino bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, se identificaron ocho comunidades vegetales, pátula, oaxacana, pseudostrobus, duglasiana, ayacahuite, teocote, rudis y leiofila, denominadas así de acuerdo a la especie presente de mayor importancia.

En el área de estudio se presentan bosques heterogéneos con alta diversidad de especies arbóreas. Esta diversidad se presenta de manera diferente dependiendo de la comunidad fitosociológica de que se trate, las comunidades pátula y ayacahuite son las más diversas biológicamente con una estructura más sólida, donde se llegaron a registrar hasta 26 especies de árboles, la comunidad rudis fue la que presentó la menor variación con solo cuatro especies.

Las especies de pinos son las más importantes al considerar que son las especies que dominan al ocupar mayor área basal, las más abundantes al registrar el mayor número de árboles por unidad de superficie y las más frecuentes al estar distribuidas en la mayor parte del área. A pesar de la alta diversidad de especies arbóreas, la mayoría de ellas están representadas por árboles en poca cantidad, de pequeñas dimensiones y distribuidos esporádicamente.

En el bosque de pino pátula, el más importante en el área de estudio, se presentaron diferencias en la diversidad de especies arbóreas según la etapa de desarrollo silvícola, en bosques maduros, del tipo fustal medio y fustal viejo, se registraron valores que indicaron mayor diversidad de árboles que en bosques inmaduros del tipo latizal y fustal joven, que mostraron menor diversidad, por lo que se infiere que la aplicación de tratamientos silvícolas han modificado las condiciones de diversidad y estructura de rodales.

El grado de mezcla de las especies arbóreas varió de acuerdo a la comunidad fitosociológica, las comunidades pátula, ayacahuite, leiofila y oaxacana conformaron un grupo donde se registraron valores que indicaron la mayor mezcla de especies de árboles, la comunidad rudis fue la que presentó la menor mezcla, situación atribuible a la abundancia relativa de las especies.

El arreglo espacial horizontal de los árboles mostró un comportamiento similar para las ocho comunidades fitosociológicas, al presentar un patrón general de distribución aleatorio, aunque también en cada una de las comunidades se registraron proporciones menores con distribución regular y en grupos.

El tamaño de los árboles, definido a través de la dominancia en diámetro a nivel de especies, de forma general fue diverso y cubrieron proporcionalmente las diferentes condiciones como árboles dominantes, codominantes y suprimidos, lo que permite suponer, si se mantienen las condiciones normales, la continuidad del ecosistema en el mediano y largo plazo.

La comunidad leiofila y *Pinus leiophylla* como su principal representante, con base en los resultados de las variables e índices evaluados, mostraron una distribución restringida, alta competencia al presentar de los mayores grados de mezcla, en su mayoría son árboles grandes y una mínima proporción son árboles pequeños, se considera que es una especie que puede estar siendo desplazada, por lo que habría que reforzar su estudio.

En lo que respecta al análisis del crecimiento en altura dominante para pino pátula, el modelo Chapman-Richards de tipo polimórfico presentó las mejores condiciones de ajuste estadístico y un comportamiento lógico cuando las curvas de proyección se comparan con los datos. La profundidad del suelo en el horizonte A influye de manera significativa en el crecimiento en altura dominante que alcanza pino pátula a una edad base invariante.

ANEXO I

Cuadro A1. Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad pátula.

Especie	Categoría diamétrica (cm)															
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	15	18	12	6	9	9	7	6	7	3	3	2	1	1		1
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	28	28	11	10	6	3	5	3	2	2						
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	34	24	16	11	6	4	1	3	1	1				1	1	
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	30	26	18	11	12	3	1		1	1						
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley	8	15	8	10	13	10	4	8	4	4	6	2		4	2	
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	15	36	21	8	4	4	4		2	6			2			
<i>Clethra lanata</i> Michx.	44	49	5	3												
<i>Cinnamomum areolatum</i> (L.)Kosterm.	42	27	20	4	4				2							
<i>Alnus acuminata</i> Kunth.	13	44	25	13		6										
<i>Psychotria</i> sp.	86	9														
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	7	21	43		7	21										
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.			25	13	13	13		13	13	13						
<i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Decne et Plan.	71	14	14													
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.			25			25		25	25							
<i>Cinnamomum</i> sp.	43	29	29													
<i>Abies hickeli</i> Flous et Gausson.	33	33	33													
<i>Quercus laurina</i> Bonpl.	13	38	13	38												
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede.	22		11	22	22	11	11									
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	100															
<i>Quercus scytophylla</i> Liebm.	75	25														
<i>Litsea</i> sp.	100															
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.		50	50													
<i>Viburnum</i> sp.	100															
<i>Ternstroemia pringlei</i> Rose.	100															
<i>Rheedia macrophylla</i> (Mtz.) Planch et Tri.	100															
<i>Litsea glaucescens</i> H.B.K.	100															

Cuadro A2. Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad oaxacana.

	Categoría diamétrica (cm)															
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	9	9	5	6	12	16	6	12	7	5	5	3	3	2	1	1
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	21	37	23	15	5											
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	30	30	27	5	6	2										
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	37	31	20	4	6			2								
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	41	41	7	7	3											
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	13		7	13	20	13	13	20								
<i>Pinus leiophylla</i> Schl et Cham.		33	13	20	13			13	7							
<i>Cercocarpus</i> sp	50		50													
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.			50							50						
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	33		33				33									
<i>Litsea</i> sp.	50	50														
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.			100													
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.	100															
<i>Rheedia macrophylla</i> (Mtz.)	100															
<i>Bacharis conferta</i>	100															

Cuadro A3. Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad pseudostrobus

Especie	Categoría diamétrica (cm)															
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	95	
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	15	20	16	12	6	7	3	4	5	6	1	2	1	1	1	
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	13	8	20	15	13	10	3	3	8	5		3	3			
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	41	11	11	8	14	8		5		3						
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	24	38	21	7	7		3									
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.						67			33							
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	67							33								
<i>Quercus corrugata</i> Hook.		25	25		25						25					
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.			33		33		33									
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.										100						
<i>Abies hickeli</i> Flous et Gausson.				50	50											
<i>Clethra lanata</i> Michx.		50			50											
<i>Pinus michoacana</i>								100								
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.					100											
<i>Ternstroemia pringlei</i> Rose.				100												
<i>Cinnamomum</i> sp.		100														

Cuadro A4. Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad duglasiana.

Especie	Categoría diamétrica (cm)												
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.	43	16	11	10	6	1	3	2	4	2	1	1	
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	22	35	18	12	5	2	5	1					
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.	41	32	15	2	10								
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	36	43	14					7					
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	20		20	20			20				20		
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	50			25	25								
<i>Pinus leiophylla</i> Schl et Cham.			33					33	33				
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	50	50											
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	80	20											
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.			100										
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	100												

Cuadro A5. Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad ayacahuite

Especie	Categoría diamétrica (cm)																			
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	00	
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	13	15	10	13	7	6	10	1	7	4	1	1	1	3		3	3	1		
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	37	25	6	2	4	4	10	4			2	2			2					
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	5	10	5	15	5	10		10	5	20			10						5	
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	13	33	13	7	17		3	7		7										
<i>Clethra lanata</i> Michx.	31	47	16	6																
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.		15		15	23	15	8	15			8									
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.		33	33									33								
<i>Cinnamomum areolatum</i> (L.)Kosterm.		50	50																	
<i>Abies hickeli</i> Flous et Gausсен.					50				50											
<i>Litsea</i> sp.	50			50																
<i>Alnus acuminata</i> Kunth.			50		50															
<i>Psychotria</i> sp.	50	50																		
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.				50		50														
<i>Mora montés</i>	100																			
<i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Dec.					100															
<i>Rheedia macrophylla</i> (Mtz.) Pla			100																	
<i>Cinnamomum</i> sp.		100																		
<i>Ternstroemia pringlei</i> Rose.	100																			
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	100																			

Cuadro A6. Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad teocote

Especie	Categoría diamétrica (cm)											
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	65	70
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	13	4	9	18	19	7	6	6	4	7	3	1
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	13	19	22	22	9	9	3			3		
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	62	21	14		3							
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	60		20	20								
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley.	20						40	40				
<i>Quercus rugosa</i> Masam.						100						
<i>Alnus acuminata</i> Kunth.		100										
<i>Psychotria</i> sp.	50	50										
<i>Pinus douglasiana</i> Mtz.				100								

Cuadro A7. Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la comunidad rudis

Especie	Categoría diamétrica (cm)							
	10	15	20	25	30	35	40	45
<i>Pinus rudis</i> Endl.	15	34	25	11	7	5	3	1
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	42	37	12	7			2	
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	14	29	29	14	14			
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.								100

Cuadro A8. Distribución porcentual por categoría diamétrica de las especies presentes en la condición leiófila

Especie	Categoría diamétrica (cm)									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
<i>Pinus leiophylla</i> Schl et Cham.	3	17	3	10	31	10	14	7		3
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	54	34	5	5		2				
<i>Pinus oaxacana</i> Mirov.	17	8	8	8	8	17	8	8	17	
<i>Pinus teocote</i> Schl et Cham.	14	21	7	14	21	7	14			
<i>Quercus corrugata</i> Hook.	50	35	10					5		
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth.	56	11	11	11	11					
<i>Quercus rugosa</i> Masam.	67	33								
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg.	100									
<i>Pinus patula</i> Schl et Cham.					100					
<i>Pinus rudis</i> Endl.	100									