

ARTICULO DE INVESTIGACION

Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México

Forest structure of managed patula pine in Ixtlán de Juárez, Oaxaca, Mexico

Juan Francisco Castellanos-Bolaños¹, Eduardo Javier Treviño-Garza², Óscar Alberto Aguirre-Calderón², Javier Jiménez-Pérez², Miguel Musalem-Santiago¹ y Ricardo López-Aguillón²

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 arbolado en el terreno, en los cuatro ambientes, presentó 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.

ABSTRACT

The diversity of arboreal species and the forest structure composition of *Pinus patula* Schl et Cham under different silvicultural conditions, in Ixtlán of Juárez, Oaxaca, Mexico was evaluated and compared. 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:

Pinus patula Schl et Cham, species diversity, structural indices.

- 1 INIFAP. Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca, Melchor Ocampo núm. 7, Col. Santo Domingo, Barrio Bajo, Etla, CP 68000, Oaxaca, México. ce: castellanos.juan@inifap.gob.mx
- 2 Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera Nacional Km. 145 CP 67700 Linares, Nuevo León, México.

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 seis 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 aportar elementos de decisión para contribuir al manejo forestal.

La estructura de la masa forestal se puede definir como la forma en que los diferentes elementos del sistema se organizan en el espacio (Kimmins, 1997) y se puede describir mediante tres características: diversidad y mezcla de especies; distribución espacial y variaciones en las dimensiones de los árboles (Gadow y Hui, 1999; Franklin *et al.*, 2002).

En la característica de diversidad interesan tres aspectos, el número de

especies, la proporción de cada una de ellas, así como el grado de mezcla o la forma en que las especies se distribuyen en el espacio. La distribución espacial está condicionada, principalmente, por las relaciones entre individuos, las estrategias de regeneración de las diferentes especies, las intervenciones silvícolas y la fase de desarrollo del rodal. La variación en las dimensiones de los árboles, describe la relación de tamaños entre árboles vecinos a través de distintas variables, siendo las más frecuentes el diámetro y la altura (Del Río *et al.*, 2003).

En las áreas bajo manejo, los tratamientos silvícolas modifican la estructura de los bosques, 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.

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.

METODOLOGÍA

Ubicación

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° 18' 16" y 17° 34' 00" latitud norte; 96° 31' 38" y 96° 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.

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 m². En cada condición silvícola se

registró información en 5500 m², resultado del levantamiento de 11 sitios de muestreo, cada sitio con un área de 500 m², de forma circular. Se registró información solo 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 la tabla 1.

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 (α) 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 de pino pátula, y 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 la tabla 1 aparecen las fórmulas de los índices desarrollados.

Tabla 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_j = abundancia relativa de cada especie; n = número de especies.
Mezcla de Gadow (M_i)	$M_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_{ij}$	v_{ij} = 0 cuando el árbol vecino j pertenece a la misma especie que i ; 1 de otra forma.
Uniformidad de Ángulos (W_i)	$W_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j$	w_j = 1 cuando el ángulo α es más pequeño que 72° ; 0 de otra forma.
Dominancia (U_i)	$U_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 v_j$	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.

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%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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 v_i (Tabla 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 v_i menores de 3%, esto significa que, a pesar de existir un número razonable de especies, en la mayoría de los casos se trata de árboles

en cantidades mínimas, de pequeñas dimensiones y distribuidos esporádicamente.

Para la condición latizal, el número total de árboles fue de 780 y el área basal (AB) de 25,3 m²ha⁻¹; en la condición fustal joven se registraron 607 árboles y un AB de 37,6 m²ha⁻¹; la condición fustal medio presentó 665 árboles y el AB de 47,4 m²ha⁻¹ y en la condición fustal viejo el número de árboles fue de 597 y el AB de 50 m²ha⁻¹. En la figura 1 se presenta la distribución diamétrica de pino pátula en cada una de las condiciones. En la tabla 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 se presenta una tendencia a la alza, debido a la capacidad de rebrote que presentan, al incremento en diámetro y su incorporación en categorías mayores.

Los valores de la diversidad de especies, cuantificada a través de H' se presenta en la tabla 3. La prueba de Kolmogorov-Smirnov mostró que H' no se distribuye normalmente (KS = 0,0438 $p = 0,0001$). La prueba de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticas significativas en términos de diversidad arbórea entre las condiciones (chi-cuadrada = 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.

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,

Tabla 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

ESPECIE	VI	NA.ha ⁻¹	AB m ² .ha ⁻¹	Altura (m)		Diámetro (cm)	
	%			A	coef.var	d _{1.3 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 xala - pensis* 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, IV); *Pinus oocarpa* Schiede (III); *Abies hickelii* Flous et Gausson (IV); *Quercus laurina* Bonpl (II); *Litsea glaucescens* H.B.K.(I); *Litsea* sp. (III); *Prunus serotina* Ehrh (II); *Pinus oaxacana* Mirov (I); *Ternstroemia pringlei* Rose (IV); *Quercus scytophylla* Liebm (II); *Rheedia macrophylla* (Mtz.) Planch et Triana (II); *Viburnum* sp. (III).

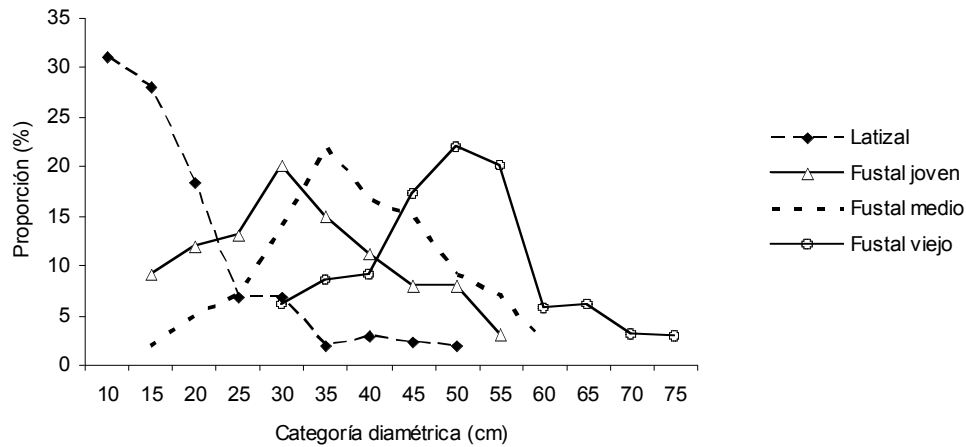


Figura 1. Distribución de categorías diamétricas de pino pátula por condición.

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 ha 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.

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-

Tabla 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

Tabla 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

cuadrado = 53.7412 y $p = 0.0001$) entre las condiciones bajo estudio (Tabla 4). A través de la prueba de Nemenyi se definió que, la condición fustal viejo con un índice Mi 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 refle-

jarán valores bajos de mezcla, como es de suponer al tener pocos vecinos de especies diferentes.

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 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

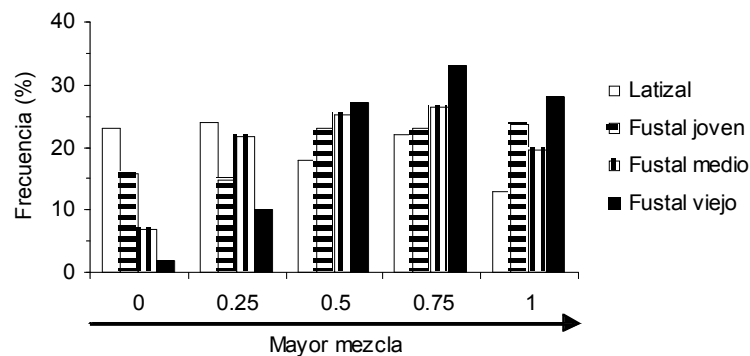


Figura 2. Distribución de la mezcla de especies por condición silvícola.

una misma especie y 35% del arbolado se mezcla con tres y cuatro especies diferentes. En contraste, la condición fustal viejo presenta 2% y 61%, respectivamente.

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 la tabla 4. La prueba de Kruskal-Wallis indicó que no existen diferencias estadísticas entre condiciones ($\chi^2 = 2,8608$ 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 de 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 en 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 deter-

minar 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 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 de 21%, con distribución aleatoria 54% y con una distribución en grupos de 25%. Al analizar la distribución espacial horizontal de los árboles solamente de pino pátula, ésta se mantuvo como aleatoria en las cuatro condiciones, estadísticamente tampoco se detectaron diferencias significativas ($\chi^2 = 3,2440$ y $p > 0,3555$).

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

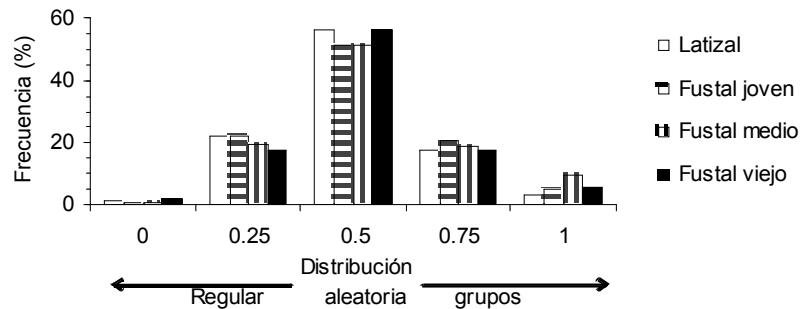


Figura 3. Distribución del Índice de Uniformidad de Ángulos (W_i) por condición silvícola.

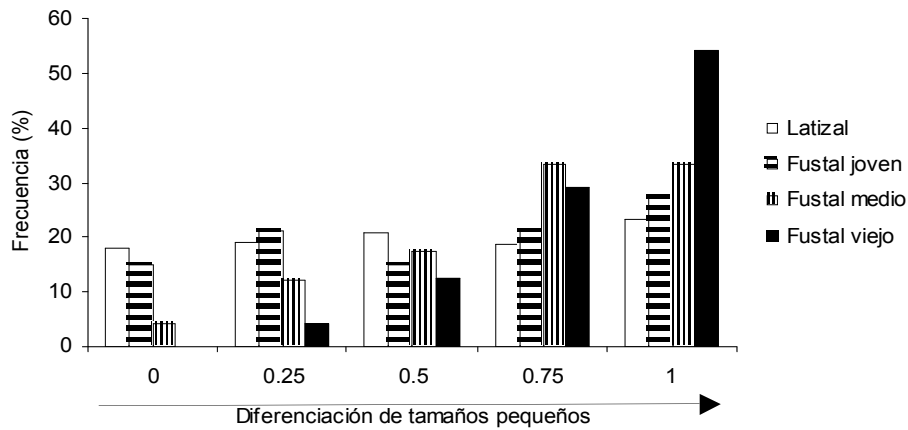


Figura 4. Distribución del Índice de Dominancia de pino pátula por condición silvícola.

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).

En lo que corresponde a la diferenciación de tamaños en diámetro para la especie de 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 la tabla 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 4 se representa con mayor detalle la distribución del índice U_i 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 29% de los árboles de referencia están rodeados de tres árboles más pequeños y 54% de cuatro árboles más pequeños.

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 o 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. Finalmente, cabe mencionar que la aplicación de tratamientos silvícolas ha modificado las condiciones de diversidad y estructura de rodales.

AGRADECIMIENTO

A la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, en especial a las autoridades comunales y los servicios técnicos forestales por todas las facilidades brindadas.

REFERENCIAS

- Aguirre C., O. A., G. Hui, K. Gadow y 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 y 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 y 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 y G. Hui. 1999. Modelling forest development. Kluwer Academic Publishers, 213 p.
- Gadow, K. Von y G. Hui. 2002. Characterising forest spatial structure and diversity. In: Bjoerk, L. (Ed). Proceedings IUFRO Int. workshop "Sustainable forestry in temperate regions". Lund, Suecia. 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 p.
- Hunter, M.L. 1999. Maintaining biodiversity in forest ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 698 p.
- Ishii, H.T., S. Tanabe y T. Hiura. 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 pinoencino 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 p.
- Kint, V., M. Van Meirvenne, L. Nachtergale, G. Geudens y N. Lust. 2003. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: A Comparison between nearest-neighbour indices and variogram analysis. *For. Sci.* 49 (1): 36-49.
- Lähde, E., O. Laiho, Y. Norokorpi y T. Saks. 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. y 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. y 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, México. *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 Fotogramé-

trico, 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. y D.E. Hibbs. 2000. A new method for modelling the heterogeneity of forest structure. *For. Ecol. Manage.* 129: 75-87.

Manuscrito recibido el 2 de octubre del 2006
Aceptado el 29 de noviembre del 2007

Este documento se debe citar como:

Castellanos-Bolaños, J. F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, M. Musalem-Santiago y R. López-Aguillón. 2008. Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 14(2):51-63.