



**ESTRUCTURA DE RODALES DE *Pinus hartwegii* AFECTADOS POR INCENDIOS UTILIZANDO PARÁMETROS DE VECINDAD EN LA SIERRA MADRE ORIENTAL, MÉXICO.**

**[STAND STRUCTURE OF *Pinus hartwegii* AFFECTED BY FIRE USING NEIGHBOURHOOD PARAMETERS IN THE SIERRA MADRE ORIENTAL, MEXICO.]**

**Diana Y. Avila-Flores<sup>1\*</sup>, Marco A. González-Tagle<sup>1</sup>, Javier Jiménez-Pérez<sup>1</sup>, Oscar A. Aguirre-Calderón<sup>1</sup>, Eduardo J. Treviño-Garza<sup>1</sup> and Benedicto Vargas-Larreta<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dept. Silvicultura, Fac. Ciencias Forestales. Univ. Autónoma de Nuevo León. Ctra. Nal., km 145, 67700, Linares, Nuevo León, México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico Forestal. Mesa del Tecnológico, s/n, 34942, El Salto, Pueblo Nuevo, Durango. México. \*Email: diesel\_dyaf@hotmail.com.

\*Corresponding author

**RESUMEN**

El objetivo de la presente investigación fue caracterizar los patrones de la estructura espacial de un bosque de *Pinus hartwegii* en la Sierra Madre Oriental, que fue afectado por un incendio en 1998. El muestreo fue estratificado, basado en función de la severidad del fuego. Se definieron tres clases de severidad de incendio en función del grado de consumo de copa (bajo, medio y alto). Tres parcelas de muestreo de 40m x 40m se establecieron por severidad. Las variables obtenidas para todos los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP)  $\geq$  5 cm en cada parcela fueron: DAP (cm) a 1.30 m, altura total (m), ubicación espacial mediante el registro de azimut ( $^{\circ}$ ) y la distancia (m) del centro de la parcela a cada árbol. Para la descripción de la estructura tres grupos de índices fueron utilizados: "agregación" ( $W_i$  y  $D_i$ ), "dominancia" ( $U_i$ ) y diferenciación dimensional ( $TD_i$  y  $TH_i$ ). El análisis de varianza mostró que existen diferencias significativas ( $p > 0.001$ ) para los parámetros dasométricos entre las severidades baja con respecto a las severidades media y alta; estas dos últimas severidades no presentaron diferencias significativas entre sí. Los resultados de la caracterización de la estructura sugieren que al incrementarse el grado de severidad del incendio, se incrementa el grado de agregación y la diferenciación dimensional y la dominancia disminuyen a medida que se incrementa el grado de la severidad.

**Palabras clave:** Distribución espacial; severidad del fuego; índice de agregación; índice de distancias; dominancia; *Pinus hartwegii*.

**INTRODUCCIÓN**

La estructura y dinámica de la mayoría de los ecosistemas forestales está fuertemente influenciada por diversos disturbios naturales, siendo el fuego

**SUMMARY**

The objective of this research was to characterize the pattern of spatial structure of a *Pinus hartwegii* forest in the Sierra Madre Oriental, affected by a fire in 1998. Sampling was stratified by fire severity. Three fire severity classes were defined based on the degree of crown consumption (low, medium and high). Three sample plots of 40m x 40m were established for each severity. The variables obtained for all trees with a diameter at breast height (DBH)  $\geq$  5 cm in each plot were: DBH to 1.30 m (cm), height (m), spatial location by recording the azimuth ( $^{\circ}$ ) and distance (m) from center of the plot to each tree. To describe the stand structure three groups of indices were employed: "contagion" and "distances" ( $W_i$  and  $D_i$ ), "dominance" ( $U_i$ ), and "size differentiation" ( $TD_i$  and  $TH_i$ ) for DBH and height respectively. An analysis of variance was performed to detect differences between dasometrics parameters by fire severity. Statistical analysis shows significant differences ( $p > 0.001$ ) in the parameters such as basal area, diameter, and height, along the low, medium, and high fire severities. The characterization of the *Pinus hartwegii* spatial structure suggests that, with increasing degree of fire severity, the stands showed an increase on the aggregation index, however, the dimensional differentiation and dominance indices decreases as the fire severity increases.

**Keywords:** Spatial distribution; fire severity; aggregation index; distances index; dominance; *Pinus hartwegii*.

uno de los más generalizados (Perry *et al.*, 2008; Bekker y Taylor, 2010; Ávila *et al.*, 2011). En dichos ecosistemas el fuego se presenta como un proceso de alteración fundamental que contribuye a la heterogeneidad ecológica (Omi, 2005). Dentro de

los componentes que integran un régimen de fuego, uno de los más importantes es la severidad, ya que es la que determina el impacto del fuego sobre la vegetación y es la que promueve la diversidad estructural, ya sea a escala de rodal o paisaje (Gill *et al.*, 1999; Bekker y Taylor, 2010). Para todo ecosistema, la estructura es considerada como un indicador de la biodiversidad (Pretzsch, 1998; Del Río *et al.*, 2003; Pomeroy, 2006), sin embargo, es fácilmente modificable, por lo que cualquier impacto, como por ejemplo un incendio, se refleja en, cambios en la distribución espacial de los árboles así como la de sus principales características. Estos cambios en la distribución de los individuos, originan que los patrones y la variación espacial de la estructura del rodal genere importantes efectos en la subsecuente sucesión de los ecosistemas forestales a escala de rodal (Yu *et al.*, 2009).

Lo anterior ha sido evidenciado por los resultados de varios trabajos que se han desarrollado al respecto. Autores como Li-juan y Jian-ping (2003), encontraron diferencias significativas post incendio en la estructura de rodales de *Pinus koraiensis* en el noreste de China, tales autores reportan condiciones de heterogeneidad tanto en las clases diamétricas como en la estructura vertical de dichos bosques. Stephens *et al.* (2004), reportaron que la presencia del fuego de severidad mixta en bosques de *Pinus radiata* generó un fragmento de distintas edades y con alta heterogeneidad espacial. Lecomte *et al.* (2006), argumentan que la diversidad estructural a nivel rodal en el bosque boreal de coníferas en el noroeste de Quebec en Canadá es el resultado de la severidad de los incendios ocurridos así como de los procesos que operan al nivel de dicha escala durante los periodos de ausencia de fuego. Lampainen *et al.* (2004), reportaron como efectos de los incendios forestales en la estructura de un bosque de *Pinus sylvestris* una gran variabilidad en la distribución de alturas y diámetros así como una gran abundancia de la regeneración post-incendio, resultados similares fueron reportados para bosques mixtos en el noreste de México por González *et al.* (2008).

La mayoría de estos estudios han sido realizados utilizando como herramienta de análisis principal, reconstrucciones históricas de la ocurrencia de incendios, sin embargo, en las últimas décadas se han desarrollado un gran número de índices para cuantificar la estructura del bosque, siendo de particular interés el conjunto de índices basados en criterios de vecindad desarrollados por Gadov y Hui (2002), los cuales miden las variaciones a pequeña escala en la posición de los árboles, las especies y sus dimensiones. No obstante, la aplicación de dichos índices se ha enfocado principalmente a evaluar los efectos de las prácticas silvícolas, siendo menor su aplicación para evaluar los efectos del fuego sobre la estructura forestal.

En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue caracterizar de los patrones de distribución espacial y dimensional empleando índices basados en relaciones de vecindad, en un bosque de *Pinus hartwegii* (Lindl.) de la Sierra Madre Oriental afectado por los incendios forestales ocurridos durante el verano de 1998.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El presente estudio se realizó en el cerro El Potosí, el cual se sitúa dentro del municipio de Galeana en el sur del estado de Nuevo León, entre los 24°50'35" y 24°53'16" de latitud Norte y los 100°13'12" a 100°15'12" de longitud Oeste (Figura 1). Fisiográficamente pertenece a la Sierra Madre Oriental. El clima es tipo BSohw(e)w", semiseco templado, registrando lluvias escasas todo el año y más del 18% de precipitación invernal. La precipitación total anual oscila entre los 400 y 600 mm, el rango de temperatura media anual fluctúa entre 12 y 18° C y registra el 10.2% de la precipitación durante el invierno (INEGI, 1986; Arreola *et al.* 2010). En esta área durante la estación seca del periodo 1997-1998 bajo las condiciones meteorológicas atribuidas al fenómeno de "El Niño" (Yocom *et al.*, 2010), se presentó un incendio forestal de grandes dimensiones, el cual fue considerado por la Comisión Nacional Forestal como el más extenso en la región (Lozano, 2006). Esta conflagración dañó los bosques de pino, eliminando casi por completo las comunidades de *Pinus ayacahuite*, y afectando en gran medida las comunidades de *Pinus hartwegii* y *Pinus cembroides* (Lozano, 2006).

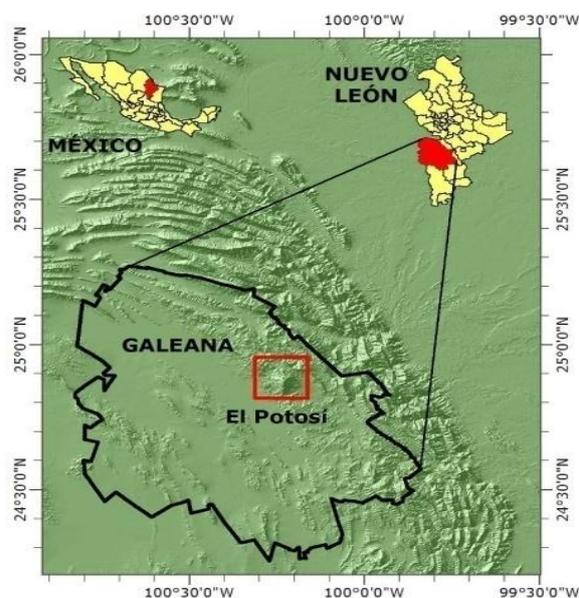


Figura 1. Ubicación del área de estudio Cerro El Potosí.

### Muestreo de campo y análisis de datos

Para determinar las severidades se tomo como base la clasificación realizada por Treviño *et al.*, (2000), quienes evaluaron las superficies incendiadas en el sur de Nuevo León, mediante el análisis de dos imágenes de satélite Landsat TM, derivando las clases de severidad de incendio así como las superficies afectadas por tipo de vegetación, dicha información fue validada en campo mediante la clasificación propuesta por Turner y Romme (1994), la cual se muestra en el Tabla 1.

Se instalaron un total de nueve parcelas de muestreo de 40 m x 40 m, (tres severidades x tres rodales/severidad). Para cada parcela y solo para aquellos individuos con un diámetro a la altura de pecho (DAP)  $\geq 5$  cm se obtuvieron las siguientes variables dasométricas: diámetro en cm a 1.30 m, altura total (m), distancia (m) y azimut ( $^{\circ}$ ) de cada árbol con respecto al centro de la parcela. Para detectar si existen diferencias significativas de las variables dasométricas entre severidades, se aplicó un análisis de varianza de un factor (ANOVA). En caso de encontrar diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) se procedió con la comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey (Zar, 1999). Los análisis fueron realizados con el paquete estadístico R (ver.2.12.2).

Para describir la estructura se utilizó un conjunto de índices para caracterizar los siguientes parámetros de los rodales: "agregación", el cuál describe cómo se distribuyen los árboles sobre el terreno, analizando las distancias entre ellos y el "grado de diferenciación", el cuál cuantifica las diferencias en tamaño de los árboles que conviven dentro del rodal (Gadow *et al.*, 2001). La base para el desarrollo de los índices fue el método de *muestreo estructural de los cinco árboles* (Albert, 1999; Hui y Hu, 2001), muestreo desarrollado para evaluar los atributos estructurales (dimensiones, especies y la regularidad de sus posiciones) de los árboles que

forman una masa forestal (Gadow *et al.*, 2001; Aguirre *et al.*, 2003). La determinación de los grupos se realizó con el apoyo del programa *Winkelmass* ver. 1.0.0 (2002), desarrollado por investigadores de la Universidad de Göttingen, Alemania. El proceso que realiza el programa *Winkelmass* para obtener los grupos estructurales es el siguiente: mediante la selección de un árbol referencia ( $j$ ), se determinan los cuatro árboles vecinos más cercanos al árbol  $j$  (grupo estructural), buscándolos en sentido de las manecillas del reloj. Este proceso es iterativo y se realiza para cada árbol que conforma la masa boscosa. De esta manera cada uno de los árboles que conforma la masa arbórea son considerados como árboles referencia ( $j$ ). El conjunto de índices empleados se muestran a continuación:

#### i) Agregación

*Índice de Uniformidad de Gadow  $W_i$* . La determinación del índice de uniformidad  $W_i$  de Gadow se basa en la medición de los ángulos entre los vecinos a un árbol de referencia  $i$  y su comparación con un ángulo estándar  $\alpha$ , de tal manera que, considerando cuatro vecinos al árbol de referencia,  $W_i$  puede tomar valores de 0 hasta 1, donde un valor cercano a cero representa condiciones de regularidad, valores cercanos al 0.5 muestran tendencia a la aleatoriedad y aquellos próximos a 1 presentan condiciones de agrupamiento:

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

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

Tabla1. Clases de severidad de incendio de acuerdo con la clasificación propuesta por Turner y Romme (1994).

Severidad	Descripción	Mortalidad post-incendio
Baja	Las copas de los árboles retienen > 20% de hojas verdes (parte superior del dosel). Los árboles permanecen verdes después del fuego.	No
Media	La mayoría de las hojas (> 80%) del dosel se presentan afectadas pero no consumidas. Hojas de color verde se pueden producir en la parte superior (<5%). El dosel presenta una coloración marrón después del incendio (se mantienen las hojas quemadas).	Si
Alta	Dosel con más del 80% de las hojas consumidas y el resto (si lo hay) con señales de daño.	Si

**Índice de distancias.** El índice de distancias  $D_i$ , caracteriza la distribución individual de los árboles en un bosque en base a la distancia del árbol de referencia a sus vecinos más cercanos (Pommerening *et al.*, 1996; Pommerening, 1997):

$$D_i = \frac{1}{n} \sum_j^N dij; \bar{D}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_i$$

Dónde:  $dij$  = distancias del árbol  $i$ -ésimo a su vecino  $j$ -ésimo,  $n$  = número de vecinos considerados,  $\bar{D}_i$  = distancia promedio de la parcela  $i$  y  $N$  = número de grupos estructurales determinados por el programa Winkelmass. Las distancias promedio de cada severidad fueron distribuidas en diez clases de distancias que comprenden rangos de dos metros: clase 1:  $0 < D_i \leq 2$  m; clase 2:  $2 \text{ m} < D_i \leq 4$  m;...; clase 9:  $16 \text{ m} < D_i \leq 18$  m; clase 10:  $18 \text{ m} < 20$  Di. (Aguirre *et al.*, 1998).

i) Diferenciación dimensional

**Índice de dominancia  $U_i$ .** El índice de dominancia, también conocido como medida del entorno describe la dominancia relativa de una especie en su entorno directo. Este índice se define como la proporción de los  $n$  vecinos más próximos al árbol de referencia que son de menor tamaño que él:

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

Siendo  $0 \leq U_i \leq 1$  y  $v_j$  es igual a 1 si el árbol  $j$  es menor que el árbol de referencia  $i$  y 0 en caso contrario. Con cuatro vecinos  $U_i$  puede tener cinco valores, que corresponden a las clases sociales propuestas por Kraft (1884):  $U_i = 0.0$  si los cuatro vecinos son más grandes que el árbol referencia  $i$  (suprimido);  $U_i = 0.25$  si tres de los vecinos son más grandes (intermedio);  $U_i = 0.50$  si dos de los vecinos son más grandes (codominante);  $U_i = 0.75$  si uno de los cuatro vecinos es más grande (dominante) y  $U_i = 1$  si ninguno de los cuatro vecinos es más grande que el árbol de referencia  $i$  (muy dominante).

**Índice de diferenciación diamétrica ( $TD_i$ ) y de altura ( $TH_i$ ).** Índice que se puede aplicar a cualquier variable que represente el tamaño de un árbol y considera el grado de diferenciación en diámetros y/o alturas tomando en cuenta los  $n$  árboles más cercanos al árbol de referencia. El valor de ambos se incrementa al aumentar la diferencia media de los tamaños de los árboles cercanos al árbol de referencia. Un valor de cero

corresponde a una situación donde todos los árboles tienen el mismo tamaño (Gadow *et al.*, 2007):

$$TD(i) = \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{n} \sum_n \left( 1 - \frac{d_{min}}{d_{max}} \right)$$

$$TH(i) = \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{n} \sum_n \left( 1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right)$$

Donde  $TD(i)$  y  $TH(i)$  = diferenciación diamétrica y en altura de la parcela  $i$ ;  $n$  = número de vecinos considerados;  $N$  = número de árboles medidos;  $d_{min}$ ,  $d_{max}$ ,  $h_{min}$  y  $h_{max}$  = son los diámetros y alturas menor y mayor entre  $i$  y cada uno de sus  $n$  vecinos.

Para la determinación de la diferenciación en diámetro y altura se consideraron los datos de cada árbol referencia y los de sus cuatro vecinos más próximos. Por lo que la interpretación de los valores de los índices es acorde a lo siguiente: un valor de  $TD = 0$  significa que el diámetro normal de los árboles vecinos es igual; para un  $TD = 0.1$  el diámetro del árbol más delgado es 10% menor que el del más grueso. Consecuentemente, valores de  $TD$  de 0.2 a 0.9 indican que los diámetros normales de los árboles menores son de 20 a 90 % más pequeños que los de aquellos con mayor diámetro (Fülder, 1995). El rango de valores de  $TD$  se clasifico en diez clases de diferenciación dimensional (0.0 a 0.1; 0.1 a 0.2, etc.) mismas que se concentraron en cinco grupos de diferenciación dimensional (baja: 0.0-0.2; moderada: 0.2-0.4; media: 0.4-0.6; alta: 0.6-0.8; muy alta: 0.8-1.0) (Aguirre *et al.*, 1998; Jiménez *et al.*, 2001). El criterio anterior fue aplicado para la variable altura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características dasométricas por severidad

Los resultados del análisis estadístico indican que existen diferencias significativas entre las variables dasométricas evaluadas de área basal, densidad, altura y diámetro (Tabla 2). Las medias del área basal presentaron diferencias significativas solo entre las severidades baja y alta ( $p > 0.001$ ). De igual manera para la variable diámetro se encontraron diferencias significativas, entre las severidades baja y alta ( $p > 0.001$ ). Para la variable altura, las diferencias significativas, se presentaron solo entre las severidades baja-media ( $p > 0.001$ ) y severidades baja-alta ( $p > 0.001$ ). A pesar de no haberse encontrado diferencias significativas entre las severidades media y alta se puede observar que conforme aumenta la severidad del incendio los valores de las variables dasométricas evaluadas tienden a disminuir.

Tabla 2. Características dasométricas de los rodales de *Pinus hartwegii* en las diferentes clases de severidad estudiadas en el Cerro El Potosí.

Severidad	Densidad (N/Ha)	Área basal (m <sup>2</sup> /Ha)	*Diámetro (cm)	*Altura (m)
PHb	185±9.55	21.33±0.51 <sup>a</sup>	38.30±1.03 <sup>a</sup>	20.07±1.57 <sup>a</sup>
PHm	183±20.09	14.45±1.02 <sup>b</sup>	31.76±2.06 <sup>b</sup>	14.89±0.82 <sup>b</sup>
PHa	150±37.50	11.21±5.35 <sup>b</sup>	30.46±6.83 <sup>b</sup>	16.36±2.26 <sup>b</sup>

PHb=severidad baja, PHm=severidad media, PHa=severidad alta. ±desviación estándar. Letras iguales en cada columna indican diferencias estadísticamente no significativas entre severidades.\*parámetros ponderados al área basal.

## Parámetros de la estructura espacial

### Distribución espacial

Los valores medios del *Índice de Uniformidad de Gadow* fueron  $W_i = 0.528$ ,  $0.550$  y  $0.594$  para severidad baja, media y alta respectivamente. Hui y Gadow (2002), mencionan que valores menores a  $0.475$  sugieren una distribución regular y aquellos mayores a  $0.517$  una distribución irregular con tendencia a la formación de grupos. Acorde con ello, los valores de  $W_i$  obtenidos para las tres severidades en este trabajo, indican una distribución irregular con tendencia a la agrupación. Tal condición puede ser observada en la distribución de frecuencias por grupo estructural donde el mayor porcentaje de grupos para cada severidad se ubicó en las categorías  $W_i=0.50$  y  $W_i=0.75$  (Figura 2).

Al respecto, autores como Beaty y Taylor (2007), reportaron para bosques de coníferas de California, impactados por el fuego, que el patrón de distribución espacial de los árboles, presentaba condiciones de agrupamiento. Tales condiciones se asocian principalmente al modelo de propagación del fuego, el cual esta determinado por las condiciones topográficas, climáticas y de la vegetación (Taylor, 2002). En este sentido, de

acuerdo al modelo de propagación del fuego se promueve la apertura de espacios que permiten el establecimiento de nuevo individuos, es así, que autores como Bekker y Taylor (2010), refieren que severidades de incendio de moderada a alta intensidad, pueden afectar seriamente la estructura del bosque matando a muchos árboles, tanto jóvenes como adultos y/o especies de corteza delgada, lo que promueve el desarrollo de masas forestales de distintas edades y por ende de distintas dimensiones y con un arreglo espacial distinto.

Para el índice de distancias  $D_i$ , las severidades presentaron los siguientes valores medios: severidad baja con un  $\bar{D}_i = 6.49 m$ , severidad media con un  $\bar{D}_i = 5.63 m$  y la severidad alta con un valor  $\bar{D}_i = 6.33 m$ . Tales valores indican que el arreglo espacial de los árboles por grupo estructural para cada severidad tiene una distribución irregular, tomando como base las distancias entre un árbol referencia  $i$  y sus cuatro vecinos más cercanos. Tal arreglo se confirma en la distribución de frecuencias por grupo estructural, donde se logra apreciar que las tres severidades presentaron la mayor frecuencia de grupos estructurales entre las clases de distancias tres y cuatro (Figura 3).

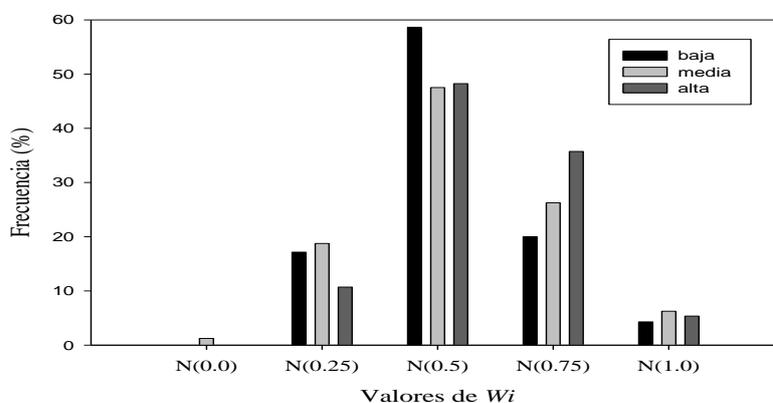


Figura 2. Distribución de frecuencias del *Índice de Uniformidad de Gadow* para las tres severidades del incendio para los rodales de *Pinus hartwegii* en el Cerro El Potosí.

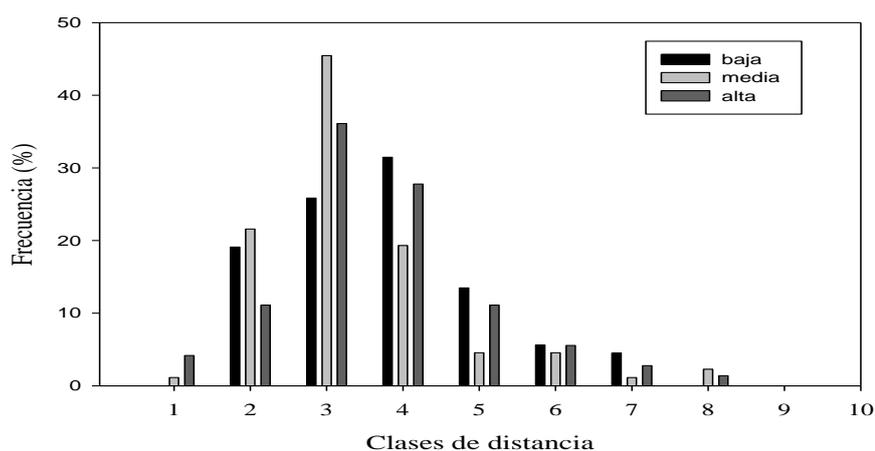


Figura 3. Distribución observada de las clases de distancias entre árboles en las tres severidades del incendio para los rodales de *Pinus hartwegii* en el Cerro El Potosí.

Con los resultados anteriores se puede observar que a lo largo del gradiente severidad en las parcelas bajo estudio, los individuos de *Pinus hartwegii* que conforman el bosque presentan una fuerte tendencia a la agrupación, es decir, presentan una distribución espacial agregada. Esta situación se ve traducida en la actualidad en rodales abiertos y con baja densidad (Tabla 2), la cual podría favorecer la regeneración natural de los bosques de *Pinus hartwegii* tal y como se reportan en los resultados de autores como Rodríguez (2001), Rodríguez y Fulé (2003) y Rodríguez (2008), quienes hacen referencia que el factor ecológico fuego es un elemento importante para la repoblación de la especie *Pinus hartwegii* ya que favorece la regeneración mediante la apertura de espacios y la creación de las condiciones adecuadas para el establecimiento de nuevos individuos.

#### Diferenciación espacial por dimensiones

Los valores del Índice de dominancia  $U_i$  muestran la dominancia de un árbol en particular con respecto a sus vecinos más próximos (Gadow *et al.*, 2007), en este caso, tales valores expresan la dominancia de dimensiones por diámetro y altura. Con respecto a la dominancia por diámetro los valores medios fueron  $U_i = 0.504$ ,  $0.483$  y  $0.475$  para la severidad baja, media y alta respectivamente. Para la dominancia con base en la

altura, los valores promedio fueron  $U_i = 0.500$ ,  $0.491$  y  $0.453$  por severidad respectivamente. Tales valores indican que solo pocos árboles, cuando son considerados como referencia, son dominantes en su entorno local, denotando con ello heterogeneidad de dimensiones diamétricas y de altura.

Lo anterior puede ser observado más a detalle en las distribuciones de frecuencia por clase de dominancia para cada variable evaluada. Así, para la variable diámetro, se observa una distribución regular de grupos estructurales en cada categoría de dominancia para cada una de las severidades (Figura 4a). Ello indica que cada grupo estructural está conformado por individuos de dimensiones diamétricas distintas. Para la dominancia por altura la distribución de frecuencias (Fig.4b), muestra que la severidad baja presenta el mayor porcentaje de sus grupos estructurales (28 y 22% respectivamente) en las categorías codominante ( $U_i = 0.5$ ) y muy dominante ( $U_i = 1.0$ ). En cuanto a las severidades media y alta presentan el mayor porcentaje de grupos estructurales en las categorías  $U=0.0$  (suprimido) y  $U= 0.75$  (dominante). Las distribuciones de frecuencias para ambas variables reflejan el contraste de dimensiones entre los individuos supervivientes al incendio y los individuos incorporados a partir de la ocurrencia del disturbio.

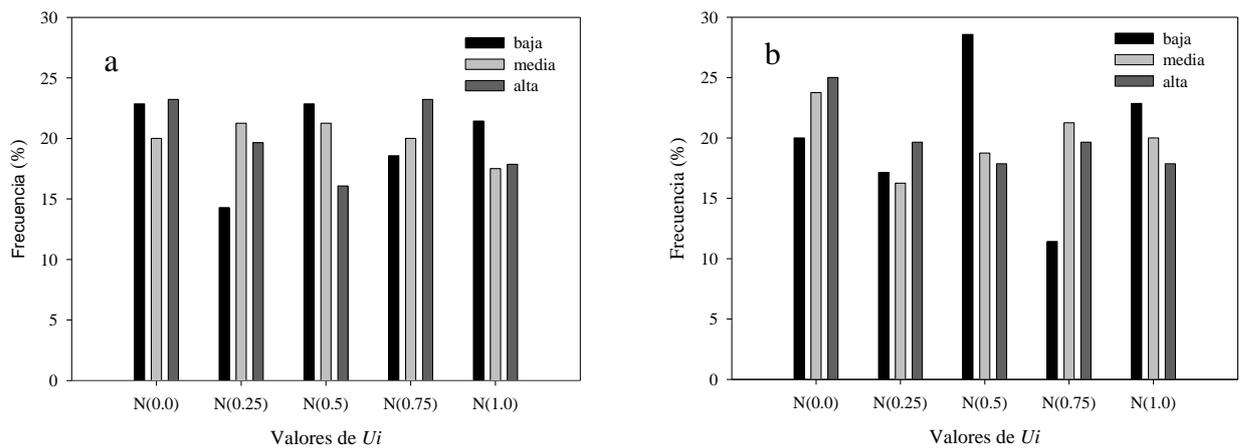


Figura 4. Distribución de frecuencias del Índice de dominancia  $U_i$  en base a diámetro (izquierda) y altura (derecha) para las tres severidades del incendio en rodales de *Pinus hartwegii* en el Cerro El Potosí.

De esta manera, los promedios de la diferenciación diamétrica fueron  $\overline{TDi} = 0.17, 0.28$  y  $0.34$  para severidad baja, media y alta respectivamente. El valor promedio obtenido para la severidad baja sugiere de la tendencia a la homogeneidad de dimensiones ya que la distribución porcentual de las frecuencias por grupos estructural muestra que más del 60% de ellos se encuentra en la categoría grado de diferenciación débil (Figura 5a), es decir, al menos dos de los árboles por cada grupo estructural son iguales en diámetro pudiendo ser mayores o menores que el árbol referencia. La severidad media registro la mayor cantidad de grupos (37%) en la categoría moderado y la severidad alta en la categoría débil (47%). No obstante tales severidades registran distribución de

grupos estructurales en el resto de las categorías, lo que indica que en ellas existe mayor diferencia entre los diámetros de los individuos.

Para la diferenciación en altura los valores promedio fueron para la severidad baja  $\overline{TH} = 0.11$ , severidad media  $\overline{TH} = 0.18$  y para la severidad alta  $\overline{TH} = 0.27$ . La distribución porcentual de las frecuencias para esta variable exponen que las tres severidades presentan la mayor cantidad de grupos estructurales en la categoría débil (87, 69 y 48 % respectivamente), sin embargo es importante resaltar que las severidades media y alta si presentan presencia de grupos en el resto de las categorías (Figura 5b).

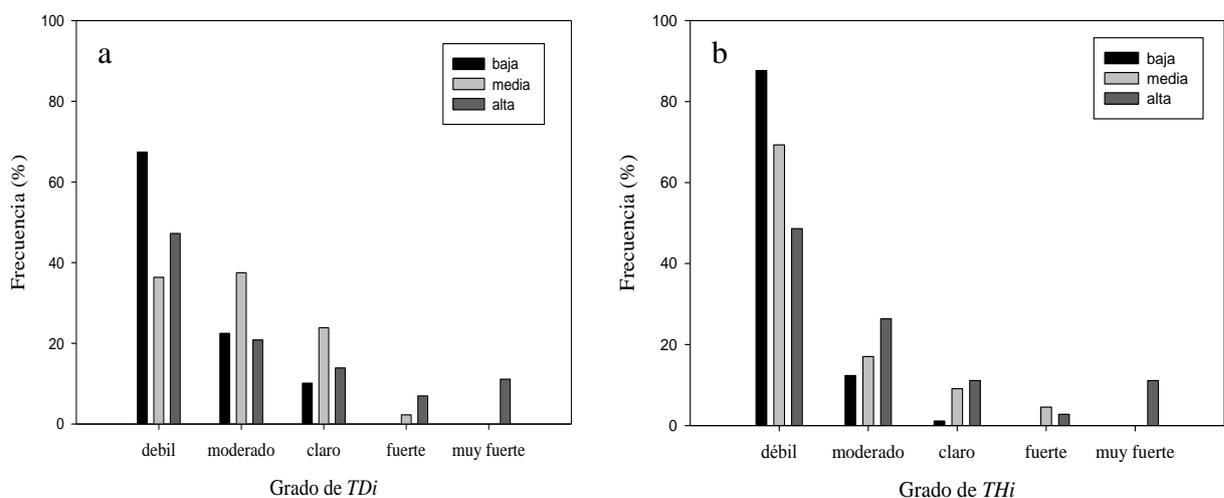


Figura 5. Distribución de valores del grado de diferenciación diamétrica  $TDi$  (a) y de altura  $THi$  (b) en las tres severidades del incendio para los rodales de *Pinus hartwegii* en el Cerro El Potosí.

Los resultados obtenidos por el índice de diferenciación e índice de dominancia para las variables de diámetro y altura, muestran que en la severidad alta es en la que se presenta el mayor contraste de dimensiones. Así mismo, se nota una tendencia al aumento de la agregación y la diferenciación dimensional conforme aumenta la severidad del fuego lo que consecuentemente genera que los valores de dominancia disminuyan conforme aumenta la severidad (Tabla 3 y Figura 6). Tales resultados están en línea con lo reportado por varios estudios afines (Lecomte *et al.*, 2006; Beaty y Taylor, 2007; González *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2009; Bekker y Taylor, 2010), quienes hacen referencia a condiciones de heterogeneidad

dimensional como efecto del impacto del fuego en bosques de coníferas.

Así mismo es pertinente mencionar que en México la utilización de este tipo de índices para el análisis de la estructura de ecosistemas forestales se ha utilizado de manera restringida para determinar la condición actual de un ecosistema (Jiménez *et al.*, 2001; Aguirre *et al.*, 2003) o estimar los efectos de las practicas silvícolas (Corral *et al.*, 2005; Solís *et al.*, 2006), siendo menos común su aplicación con un enfoque ecológico o determinar la influencia del disturbio fuego sobre las características estructurales del bosque (González *et al.*, 2008; Avila *et al.*, 2011).

Tabla 3. Valores medios de los índices aplicados de acuerdo a los rodales de *Pinus hartwegii* en las diferentes clases de severidad del incendio. (media±desviación estándar).

Índice	Severidad		
	Baja	Media	Alta
Agregación ( $W_i$ )	0.528±0.026	0.550±0.063	0.594± 0.031
Distancias ( $D_i$ )	6.49± 0.627	5.64± 0.374	6.33± 1.203
Diferenciación diamétrica ( $TD_i$ )	0.17± 0.078	0.28± 0.033	0.34± 0.113
Diferenciación en altura ( $TH_i$ )	0.11± 0.046	0.18± 0.045	0.27±0.095
Dominancia dimensional ( $U_{id}$ )	0.504± 0.038	0.483± 0.024	0.475± 0.059

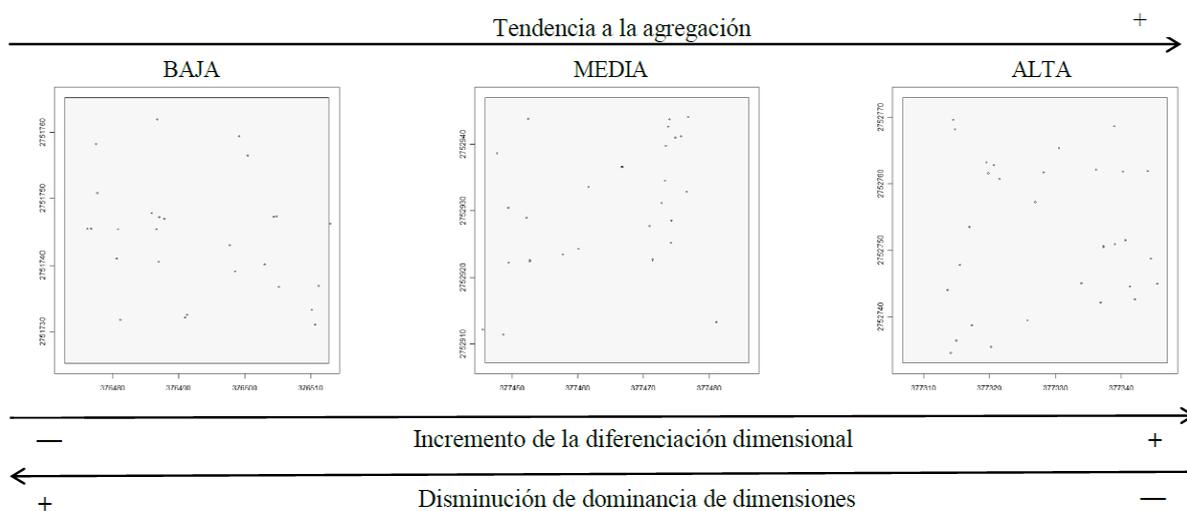


Figura 6. Distribución espacial por severidad de los individuos de *Pinus hartwegii* en el área de estudio Cerro El Potosí.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que a medida que aumenta el grado de severidad de incendio aumenta el grado de agregación del arbolado así como el grado de diferenciación dimensional. Sin embargo, el grado de dominancia en dimensiones disminuye a medida que aumenta el grado de severidad del incendio.

Así mismo, es oportuno indicar la bondad de aplicación del conjunto de índices empleados, para describir la condición estructural que presenta el bosque de *Pinus hartwegii* del cerro El Potosí, a trece años de la ocurrencia de un incendio forestal de gran magnitud. Por lo que su uso es recomendable para evaluar entre otros disturbios, los efectos del fuego sobre la diversidad estructural de los ecosistemas forestales; además poseen la ventaja de que para su cálculo se requieren inventariar variables dasométricas fáciles de obtener.

De la misma manera, los resultados obtenidos en esta investigación pusieron de manifiesto la necesidad de generar una evaluación de la condición de la regeneración de la especie bajo estudio así como también el análisis de la incidencia histórica del fuego para el área, con lo cual se podrá conocer el grado de disturbio generado y el papel que representa el fuego en el mantenimiento de los bosques de coníferas del cerro El Potosí.

## Agradecimientos

Al proyecto PAICYT-UANL (CT311-10) por el apoyo financiero para el desarrollo de la presente investigación.

## REFERENCIAS

Aguirre O., Kramer H., Jiménez J., 1998. Strukturuntersuchungen in einem Kifern Durchforschungsversucht Nordmexikos. Allgemeine Forst u Jagdzeitung 169, 213-219.

Aguirre O., Hui G., Gadow K. von., Jiménez J. 2003. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood- based variables. Forest Ecology and Management 183, 137-145.

Albert M., 1999. Analyse der eingriffsbedingten Strukturveränderung und Durchforstungsmodellierung in Mischbeständen. PhD Diss., Faculty of Forest Sciences, Univ. Göttingen, Germany. Hainholz Verlag. pp. 63-68.

Arreola O., M. R, González E., M., Nívar C., J. J. 2010. Dendrocronología de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra

Madre Oriental en Nuevo León, México. Madera y Bosques 16 (1):71-84.

Avila F, D.Y., González T, M.A., Jiménez P, J., Aguirre C, O., Treviño G, E. 2011. Assessment of Post-fire forest structural diversity using neighbourhood based parameters in the Sierra Madre Oriental, Mexico. In: Tropentag 2011. Development on the margin. International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development. Bonn, Hrsg.:M. Becker, C. Kreyene, C. Ripken, E. Tielkes. Cuvillier Verlag, Goetingen, Alemania.

Beaty R. M., Taylor A. H. 2007. Fire disturbance and forest structure in old-growth mixed conifer forests in the northern Sierra Nevada, California. Journal of Vegetation Science 18: 879-890.

Bekker M. F., Taylor A. H. 2010. Fire disturbance, forest structure, and stand dynamics in montane forests of the southern Cascades, Thousand Lakes Wilderness, California, USA. Écoscience 17 (1):59-72.

Corral R. J. J., Aguirre C. O.A., Jiménez P. J., Corral R. S., 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.

Del Río M., Montes F., Cañellas I., Montero G. 2003. Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. Invest Agrar: Sist Recur For 2(1), 159-176.

Fülde K., 1995. Zur Strukturbeschreibung in Mischbeständen. Forstarchiv 66, 149-161.

Gadow K. von., Real P., Álvarez G.J. 2001. Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. IUFRO World Series. Vol. 12, 242 pp.

Gadow K.von., Hui G. Y., 2002. Characterising forest spatial structure and diversity. In: Bjoerk, L. (Ed.), Proceedings of the IUFRO International workshop 'Sustainable forestry in temperate regions', Lund, Sweden, pp. 20-30.

Gadow, K. von., Sánchez O. S., Álvarez G. J.G., 2007. Estructura y Crecimiento del Bosque. 287 pp.

Gill M., Woinarski J., York A., 1999. Australia's biodiversity responses to fire. Biodiversity Technical Report No. 1, Environment Australia.

- González T, M. A., Schwendemann, L., Jiménez P, J. y Schulz, R. 2008. Forest structure and woody plant species composition along a fire chronosequence in mixed pine-oak forest in the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico, *Forest Ecology and Management* 256: 161-167.
- Hui G.Y., Hu Y.B., 2001. Measuring species spatial segregation in mixed forest. *For Res* 14(1):23-27.
- Hui G.Y., Gadow K. von. 2002. Das Winkelmaß. Herteilung des Optimalen Standarwinkels. *Allgemeine Forst u Jagdzeitung* 10, 173-177.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1986. Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. México.
- Jiménez J., Aguirre C.O., Kramer H. 2001. Análisis de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* Vol. 10 (2): 355-366.
- Kraft G., 1884. Beiträge zur lehre von den durchforstungen, schlagstellungen und lichtungshieben. Verlag Keindworth, Hannover. 147 pp.
- Lampainen, J., Kuuluvainen, T., Wallenius, T.H., Karjalainen, L., Vanha-Majamaa, I. 2004. Long-term forest structure and regeneration after wildfire in Russian Karelia. *Journal of Vegetation Science* 15: 245-256.
- Lecomte N., Simard M., Bergeron Y. 2006. Effects of fire severity and initial tree composition on stand structural development in the coniferous boreal forest of northwestern Québec, Canada. *Écoscience* 13(2): 152-163.
- Li-juan, L., G. Jian-ping. 2003. Effects of fire disturbance on the forest structure and succession in the natural broad-leaved/Korean pine forest. *Journal of Forestry Research* 14(4): 269-274.
- Lozano, F. 2006. Los incendios en Nuevo León, México, durante el verano de 1998. Laboratorio de Sistemas de Información Georeferenciada. Centro de Calidad Ambiental, ITESM Campus Monterrey. En línea: <http://albers.mty.itesm.mx/proyectos/incendios/indexincendios.html#potosi>. Consultado Agosto 2010.
- Omi P.N., 2005. *Forest Fires: a reference handbook*. ABC-CLIO, Inc. Santa Barbara, California. 345 pp.
- Perry D. A., Oren R., Hart S. C. 2008. Disturbance in forest ecosystems. In: *forest ecosystems*. Ed. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, Maryland, E.U.A. pp. 86-117.
- Pommerening A., Wiergard C., Gadow K. von. 1996. Bestandesinventuren in strukturreichen Wäldern. Information für die Zielstärken – und Wertnachhaltigkeit. Projektbericht. Göttingen. 68 pp.
- Pommerening A. 1997. Eine Analyse neuer Ansätze zur Bestandesinventur in Strukturreichen Wäldern. Dissertation. Göttingen Universität. Cuvillier Verlag, Göttingen, 150 pp.
- Pommerening A. 2006. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis. *Forest Ecology Management*, 224: 266–277.
- Pretzsch H. 1998. Structural diversity as a result of silvicultural operations. *Lesnictví-Forestry* 44(10), 429-439.
- Rodríguez T. D.A. 2001. Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2): 145-151.
- Rodríguez T. D.A., Fulé P. Z. 2003. Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. *International Journal of Wildland Fire* 12:23-37.
- Rodríguez T. D.A. 2008. Fire Regimes, fire ecology and fire management in Mexico. *A Journal of the Human Environment* 37(7):548-556.
- Stephens S.L., Piirto D.D., F. Caramagno D. 2004. Fire Regimes and Resultant Forest Structure in the Native Año Nuevo Monterey Pine (*Pinus radiata*) Forest, California. *Am. Midl. Nat.* 152:25–36.
- Solís M. R., Aguirre C.O.A., Treviño G. E.J., Jiménez P.J., Jurado Y. E., Corral R. J. 2006. Efectos de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México. *Madera y Bosques* 12(2):49-69.
- Turner M. G., Romme W.H. 1994. Landscape dynamics in crown fire ecosystems. *Landscape Ecology*, 9: 59–77.
- Treviño G. E.J., Jimenez P. J., Aguiire C. O.A. 2000. Evaluación de las superficies incendiadas en el sur de Nuevo León

- susceptibles a restauración. VIII Simposium Internacional de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota, Iguazú, Argentina. 6-10 de noviembre de 2000. 353-362 pp. Publicado en CD.
- Winkelmann. 2002. Forest Management and Harvest Institute. Goettingen University.
- Yu H., Wiegand T., Yang X., Ci L. 2009. The impact of fire density-dependent mortality on the spatial patterns of a pine forest in the Hulun Buir sandland, Inner Mongolia, China. *Forest Ecology and Management* 257: 2098-2017.
- Yocom L.L., Fulé P.Z., Brown P.M., Cerano J.N., Villanueva D. J., Falk D.A., Cornejo O. E. 2010. El Niño–Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology* 91(6):1660-1671.
- Zar, J.H. 1999. *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, New Jersey, 4. ed. 663 pp.

*Submitted January 23, 2012 – Accepted April 17, 2012*  
*Revised received May 18, 2012*