



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.614>

Artículo

## Estructura espacial de los bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango

### Spatial structure of the mixed and uneven-aged forests in the state of *Durango*

Gustavo Alfredo Chávez-Flores<sup>1</sup>, José Javier Corral-Rivas<sup>2\*</sup>, José Daniel Vega-Nieva<sup>2</sup>,  
Pablito Marcelo López-Serrano<sup>3</sup> y Ernesto Alonso Rubio-Camacho<sup>4</sup>

#### Abstract

The purpose of this work was to describe the spatial structure and research the interactions or correlations among certain tree characteristics in the mixed and uneven-aged forests in the state of *Durango*. Data of individual tree location and other tree attributes of 446 permanent forest research plots were used. The spatial tree distribution and the interactions among groups of species were determined with the use of the second-order statistic known as Ripley's K function in its univariate  $L(r)$  and bivariate  $L_{12}(r)$  normalized forms. The dimensional association between the sizes of the tree diameters was evaluated with the use of the mark correlation function  $Kmm(r)$ . The results provided by these statistical tools allow to determine that the spatial structure of the evaluated forests has a complex nature and depends on the scale at which it is analyzed. At distances under 2 m, the random spatial distribution of the trees dominates, while at distances over 2 m the clustering of trees is prevalent. On the other hand in most of the studied sites no significant interactions or mixtures in the spatial distribution of trees of pine and oak were observed, indicating that regeneration and selective silviculture follow a random pattern. The analysis of the spatial interaction between the tree diameter sizes keeps an independent spatial distribution pattern, in which trees with different diameters are mixed randomly within the studied sites.

**Key words:** Spatial distribution, mark correlation function, Ripley's K function, point pattern, *Sierra Madre Occidental*, permanent forest and soil research sites.

#### Resumen:

El propósito de este trabajo fue describir la estructura espacial e investigar las interacciones o correlaciones espaciales entre algunas características de árboles en bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango. Se usó la localización horizontal y ciertos atributos de los individuos arbóreos de 446 sitios permanentes de investigación forestal y de suelos. La distribución espacial, así como la interacción entre grupos de especies se determinaron con el empleo de estadísticos de segundo orden como la función  $K$  de Ripley en sus formas normalizadas univariada  $L(r)$  y bivariada  $L_{12}(r)$ . La asociación dimensional de los árboles se evaluó con el uso de la función de correlación de marcas  $Kmm(r)$ . Estas herramientas estadísticas permitieron determinar que la estructura espacial de los bosques estudiados es de naturaleza compleja y dependiente de la escala de evaluación con que se analice. A distancias menores de 2 m domina una distribución espacial aleatoria del arbolado, mientras que a distancias mayores de 2 m predomina el agrupamiento. Por otra parte, en la mayoría de los sitios no se observaron interacciones o mezclas significativas en la distribución de los árboles de *Pinus* y *Quercus*, lo cual indica que la regeneración y la silvicultura siguen un patrón aleatorio. El análisis de la interacción espacial entre los tamaños de los diámetros de los árboles significa la existencia de un patrón de distribución espacial independiente, en el que los individuos de diferentes diámetros están mezclados de manera aleatoria dentro de los sitios de muestreo.

**Palabras clave:** Distribución espacial, función de correlación de marcas, función  $K$  de Ripley, patrón de puntos, *Sierra Madre Occidental*, sitios permanentes de investigación forestal y de suelos.

Fecha de recepción/Reception date: 25 de junio de 2019

Fecha de aceptación/Acceptance date: 30 de marzo de 2020

<sup>1</sup>Maestría Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED). México

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango UJED. México

<sup>3</sup>Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango UJED. México

<sup>4</sup>Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, CIR- Pacífico Centro, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: jcorral@ujed.mx

## **Introducción**

El estado de Durango es reconocido como la principal reserva forestal de México (SRNyMA, 2016). Esta importante posición hace que sea primordial generar información veraz y confiable que permita determinar la condición actual de sus bosques, con el fin de conocer su dinámica y crecimiento, tanto por razones de manejo como por cuestiones de difusión pública (Corral-Rivas *et al.*, 2009).

La estructura de un ecosistema forestal se define por el tipo, número, arreglo espacial y temporal de los elementos que lo componen. En ese contexto, destacan las estructuras de especies, la espacial y la dimensional (Aguirre-Calderón, 2002); ya que conocerlas es importante para fines de manejo forestal por cuatro grandes razones (Kint *et al.*, 2003): 1) la estructura del bosque está directamente relacionada con el hábitat de muchos taxones de flora y fauna, además es utilizada como un indicador de biodiversidad; 2) su descripción brinda un conjunto de parámetros, los cuales pueden usarse para la evaluación de escenarios ambientales a largo plazo; 3) la descripción simple de la estructura del bosque (categórica o por índices) se emplea para reconstruir el bosque por computadora, esto ofrece una gama amplia de posibles aplicaciones en el trabajo de inventarios forestales; y 4) los elementos estructurales son una fuente de información de gran utilidad para el tomador de decisiones, ya que le permitirá conocer la dinámica y la productividad del bosque.

Dado que los árboles utilizan espacio vertical y horizontal, el análisis de su estructura resulta complicado (Baca, 2000); sin embargo, se simplifica representando la localización horizontal de los árboles de un rodal en un plano de dos dimensiones: cada individuo corresponde a un punto definido por sus coordenadas, y el rodal se considera como un grupo finito de puntos, denominado patrón de puntos (Mora-Donjuán *et al.*, 2016). Además, a partir del conocimiento de las características o marcas cuantitativas y cualitativas como dimensiones, especie, etcétera se aplica la teoría del patrón de puntos para describir la distribución espacial y las interacciones de los árboles que componen el rodal (Stoyan y Penttinen, 2000).

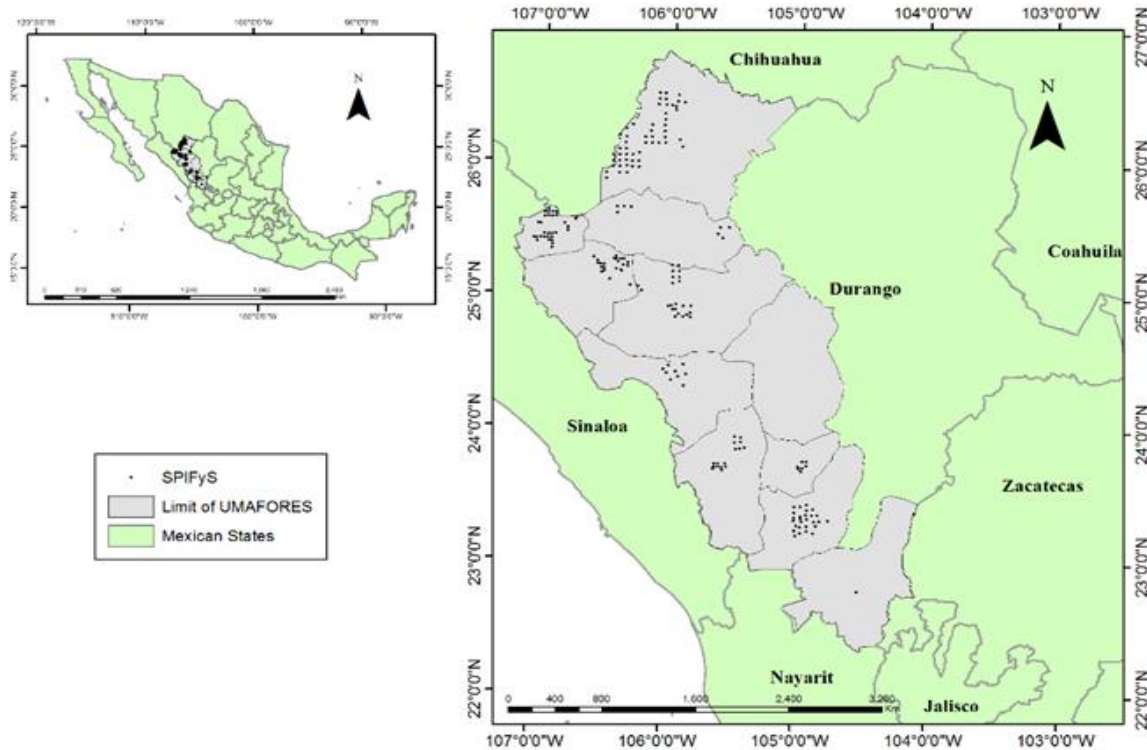
Actualmente, existen diversos métodos estadísticos para caracterizar un patrón de puntos marcados, que se clasifican como de primer y segundo orden (Wiegand, 2007). Los métodos de primer orden se usan para realizar caracterizaciones detalladas de la distribución espacial de los árboles; los de segundo orden suelen sumar la interacción o repulsión entre un patrón de puntos (De la Cruz, 2008). En estos últimos, la función  $K$  de Ripley y la función de correlación de marcas (*Mark Correlation Function* [MCF]) son las más usadas (Rubio-Camacho *et al.*, 2017). La función  $K$  de Ripley permite determinar, si el conjunto de puntos tiende a ser regular, agrupado o aleatorio a diferentes escalas; mientras que, con la MCF es posible establecer, si a una escala específica existe una correlación entre la distribución de los puntos con algunos atributos en particular (Stoyan y Stoyan, 1994).

El presente trabajo se desarrolló con información de 446 sitios de una red nacional de sitios permanentes de investigación forestal y de suelos, que fue implementada por la Comisión Nacional Forestal con la finalidad de estudiar la dinámica de crecimiento de los paisajes productivos forestales de México (Conafor, 2013). Se presenta una caracterización de los patrones de distribución espacial del arbolado, y el análisis de interacciones entre marcas cuantitativas y cualitativas de los árboles medidos en rodales mixtos e irregulares en el estado de Durango.

## **Materiales y Métodos**

### **Área de estudio y datos**

El área de estudio comprendió 446 sitios permanentes de investigación forestal, ubicados en el sistema montañoso denominado Sierra Madre Occidental, en el estado de Durango entre las coordenadas geográficas 22°54' y 26°35' latitud norte y 104°40' y 107°06' longitud oeste, con intervalos de altitud entre 1 200 y 2 800 m (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio, con la distribución de los sitios permanentes de investigación forestal utilizados.

Los sitios se localizaron mediante un muestreo sistemático, en una malla de puntos con una separación variable de 3 a 5 km. Su tamaño fue de 50 × 50 metros; y para cada árbol con un diámetro normal (a una altura de 1.3 m sobre el nivel del suelo) mayor o igual a 7.5 cm se tuvieron las variables: especie, dominancia, diámetro normal (cm), altura total (m), altura comercial (m), cobertura (m), sanidad, daños físicos, azimut (°), distancia de los árboles al centro del sitio (m) y ubicación espacial a través de coordenadas X y Y (Cuadro 1). El diámetro normal se obtuvo como el promedio de dos mediciones en cruz con una forcípula forestal *Haglöf Mantax* 650 mm, la altura con un hipsómetro *Vertex IV Haglöf* y el azimut con un clinómetro *Tandem Suunto* 360PC/360R.

**Cuadro 1.** Resumen de las variables de rodal de los 446 sitios permanentes de investigación forestal en Durango, México.

<b>Variable del rodal</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máx</b>	<b>Mín</b>	<b>Sd</b>
<i>N</i>	633.26	2264.00	88.00	284.75
<i>G</i>	21.77	55.42	1.21	8.77
<i>Dq</i>	21.48	51.00	10.17	4.88
<i>S</i>	8	15	1	2

*N* = Número de árboles por hectárea; *G* = Área basal ( $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ ); *Dq* = Diámetro medio cuadrático (cm); *S* = Número de especies; *Sd* = Desviación estándar.

### **Caracterización de la estructura espacial**

La distribución espacial de los árboles, la interacción entre grupos de especies y los tamaños de los árboles se determinó de acuerdo a la metodología que se describe a continuación.

**Distribución espacial de los árboles.** Se aplicó la función  $K(r)$  de Ripley, probablemente una de las herramientas más utilizadas para caracterizar patrones de puntos (ecuación 1) (De la Cruz, 2013); ya que permite conocer, de manera gráfica, el tipo de distribución de los árboles en los sitios a diferentes distancias o escalas. La función  $K(r)$  representa la esperanza del número de árboles que están a una distancia igual o menor que  $r$  y el número de árboles que existen en un círculo de radio variable ( $r$ ) alrededor de un determinado árbol. La función empírica obtenida a partir de los datos reales de los sitios, se comparó con la generada en sitios simulados mediante un proceso aleatorio; de esta forma se determinaron las tipologías de las estructuras presentes en todos los sitios a distintas escalas.

$$k(r) = \frac{A}{n(n-1)} \sum_{i=j}^n \sum_{j \neq i}^n lij(r) Wij(r) \quad (1)$$

Donde:

A = Área de estudio

n = Número de puntos en el área de estudio

$lij$  = Distancia entre el  $i$ -ésimo y  $j$ -ésimo árbol

$Wij$  = Factor de corrección del efecto borde para los puntos  $i$ - $j$

Diggle (1983) en la discusión del artículo de Ripley (1977) propone usar la raíz cuadrada de la función  $K(r)$ , debido a que se estabilizan las varianzas y se facilita la interpretación (ecuación 2). La siguiente transformación tiene una media ( $\mu$ ) cero y una varianza ( $\sigma$ ) aproximadamente constante, cuando la distribución del arbolado es aleatoria:

$$L(r) = \sqrt{\frac{k(r)}{\pi} - r} \quad (2)$$

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

## Interacción entre marcas de los árboles

**Entre grupos de especies.** Para examinar la interacción o relación espacial que existe entre los árboles de los géneros *Pinus* y *Quercus*, se utilizó la función  $K_{12}(r)$  (ecuación 3), la cual determina el número de puntos de característica 2 y la distancia ( $r$ ) entre los puntos con característica 1. Su definición es la siguiente (Moeur, 1993):

$$K_{12}(r) = \frac{A}{n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j \neq i}^{n_2} l_{ij}(r) w_{ij}(r) \quad (3)$$

Donde:

$K_{12}(r)$  = Función bivariada de *Ripley*

$A$  = Superficie de área del sitio de muestreo

$n_1$  y  $n_2$  = Número de árboles con característica 1 y 2, respectivamente, de todos los pares de árboles con una distancia  $l_{ij} \leq r$

$w_{ij}(r)$  = Factor de corrección de borde igual a la inversa de la proporción de la circunferencia de un círculo centrado en el árbol  $i$  y pasando por el árbol  $j$ , ubicado dentro del sitio

( $w_{ij}(r) = 1$  para círculos completamente dentro del sitio de muestreo  $w_{ij}(r) > 1$  para los casos que requieren corrección por efecto de borde)

Su función normalizada indica la intensidad, tipo e intervalo de distribución que presentan los puntos con una característica determinada (Soto *et al.*, 2010). El valor esperado para la función  $L_{12}(r)$  es cero, cuando una distribución es independiente; positivo, cuando los puntos tienden a la atracción; y negativo, cuando los patrones tienden a la repulsión: Así, es factible definir si dos marcas (*Pinus* y *Quercus*, en este caso) se atraen, se rechazan, o son independientes entre sí:

$$L_{12}(r) = \sqrt{\frac{k_{12}(r)}{\pi}} - r \quad (4)$$

Donde:

$L_{12}(r)$  = Función bivariada de *Ripley* normalizada

$K_{12}(r)$  = Función bivariada de *Ripley*

$\pi$  = Valor de *Pi*

$r$  = Distancia

**Entre los diámetros de los árboles.** Se empleó la función de correlación de marcas  $K_{mm}(r)$  definida por la ecuación 5 (Stoyan *et al.*, 1987; Ávila-Flores *et al.*, 2014). En este trabajo,  $x$  es la ubicación del árbol y  $m(x)$  el diámetro normal usado como una característica de dicho árbol (Stoyan *et al.*, 1987). Por tanto,  $K_{mm}(r)$  se define como:

$$k_{mm}(r) = \frac{E[f(m_1, m_2)]}{E[f(m_1, m')]} \quad (5)$$

Donde:

E = Expectativas

$m_1$  y  $m_2$  = Marcas asociadas a dos puntos del proceso por una distancia  $r$

$m_1, m'$  = Realizaciones independientes de una distribución marginal de marcas

En el presente estudio, la función  $K_{mm}(r)$  relaciona los diámetros de un par de árboles situados a una determinada distancia (Penttinen *et al.*, 1992). Los valores menores a 1 sugieren una correlación negativa o mutua repulsión; los mayores a 1



indican correlación positiva o mutua atracción; y aquéllos que se mantienen en la media indican independencia entre estas marcas (Martin, 1994).

Los análisis espaciales antes descritos se realizaron para los 446 sitios permanentes disponibles para el estado de Durango. El análisis de la información se llevó a cabo con el *software* estadístico *R Studio*<sup>®</sup> (Rstudio Team, 2015), mediante las librerías *ggplot2* y *spatstat* (Baddeley y Turner, 2005).

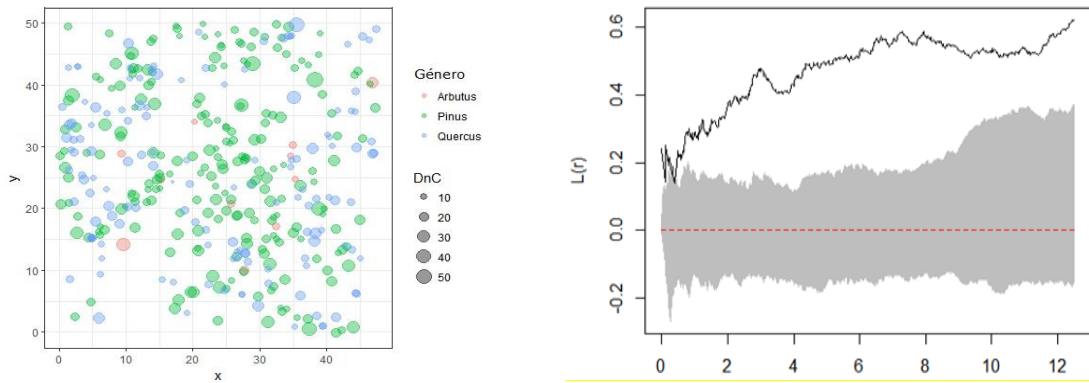
## Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados resumidos con algunos ejemplos para describir las tendencias observadas e ilustrar como el análisis espacial de patrones de puntos representa una herramienta útil para interpretar procesos de desarrollo e interacciones en los bosques mixtos e irregulares de México.

### Distribución espacial del arbolado

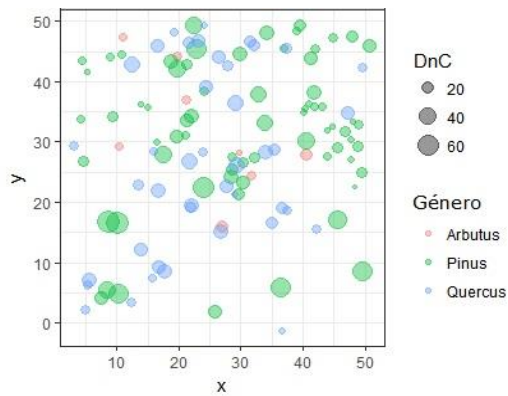
En la Figura 2 se muestra, como ejemplo, la distribución espacial actual de los árboles en dos de los sitios permanentes analizados. Al lado izquierdo (a y b) se presenta la distribución observada y a la derecha (c y d), la estimación de los valores de  $L(r)$ , en relación con el valor esperado de  $L(r)$  para una distribución completamente aleatoria, a través de los límites inferior y superior estimados con 95 % de nivel de confianza, a partir de 199 simulaciones aleatorias. En ella, se exhibe como la distribución empírica de los valores de  $L(r)$  estimada para cada sitio puede utilizarse para examinar el rechazo de una distribución aleatoria, en función de la distancia.





a) Sitio ME\_10\_00069

c)



b) Sitio ME\_10\_00169

d)

Estimación de  $L(r)$  (línea continua) a escalas de 0 a 12 m. La sombra gris representa el límite inferior y superior generados con un nivel de confianza del 95 % a partir de 199 simulaciones aleatorias. La imagen a) corresponde a una distribución agrupada (Sitio ME\_10\_00069) y b) una mezcla regular, aleatoria y agrupada (Sitio ME\_10\_00169).

**Figura 2.** Distribución espacial actual del arbolado en dos sitios característicos del área de estudio (a y b).

Aunque no se presentan los detalles para cada uno de los 446 sitios, los resultados de los dos ejemplos son característicos de los bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango.

En el Cuadro 2 se resumen la información de la distribución espacial de todos los sitios analizados en función de la escala. Se observó que en estos bosques a distancias menores de 2 m domina un patrón de puntos aleatorio, ya que la curva estimada de  $L(r)$  se mantiene dentro del intervalo de confianza definido para un patrón aleatorio de puntos; mientras que, a distancias mayores de 4 m domina una tendencia de agrupamiento en la mayoría de los sitios estudiados: los valores estimados de  $L(r)$  son positivos y se ubican por arriba del límite superior de confianza definido para un patrón de puntos completamente al azar.

**Cuadro 2.** Resultados de la función  $L(r)$  utilizada para la descripción de la distribución espacial del arbolado de 446 sitios permanentes de investigación forestal, ubicados en bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango.

<b>Escala (m)</b>	<b>Agrupado (%)</b>	<b>Aleatorio (%)</b>	<b>Regular (%)</b>	<b>Total</b>
0 a 2	46.3	52.6	1.1	100
2 a 4	53.0	46.5	0.4	100
4 a 6	59.2	40.8	0.0	100
6 a 8	60.9	39.1	0.0	100
8 a 10	57.8	42.2	0.0	100
10 a 12	53.7	46.1	0.2	100

La distribución regular del arbolado, prácticamente, no se registró dentro del área de estudio, debido a que estos bosques se regeneran de manera natural y no mediante el uso de plantaciones forestales (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2010).

Los resultados, independientemente del método utilizado para la caracterización de la distribución espacial de sitios permanentes de investigación forestal, tienen semejanza con los citados por Hernández *et al.* (2018), Solís-Moreno *et al.* (2006) y Aguirre-Calderón *et al.* (2003) quienes describen patrones de distribución con grado de agrupamiento en bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango. De acuerdo con Vallejo (2009), la distribución agrupada en los bosques se relaciona con una buena calidad del hábitat disponible para la fauna, la regeneración en claros del bosque, la dispersión limitada de semilla, así como las condiciones topográficas del terreno.

Por otro lado, existen estudios desarrollados con la función  $K$  de Ripley que describen patrones de distribución aleatoria en bosques mixtos de México, tal es el caso de Ávila-Flores *et al.* (2014), Ruiz-Aquino *et al.* (2015), y Rubio-Camacho *et al.* (2017); aunque en esos trabajos solo se hace referencia a un número limitado de sitios experimentales (2 a 9), por lo que la generalización de sus resultados no es posible.

### **Interacción entre pino y encino**

Los resultados de la función  $L_{12}(r)$  bivariada de Ripley se muestran en el Cuadro 3 e indican que en la mayoría de los sitios (82 %, en promedio) no existieron atracciones o interacciones significativas entre los árboles de *Pinus* y *Quercus* en todas las distancias consideradas; la curva estimada de  $L_{12}(r)$  se mantuvo dentro del intervalo de confianza definido para un patrón independiente de las marcas de los puntos. Sin embargo, se observó que en más de 11 % de los sitios, a distancias mayores de 6 m  $L_{12}(r)$  fue positiva y sobrepasó el límite superior definido para el intervalo de confianza de un patrón de marcas independientes; lo cual indicó una atracción positiva y significativa entre los individuos de pino y encino.



**Cuadro 3.** Resultados de la función  $L_{12}(r)$  utilizada para evaluar interacciones entre individuos de *Pinus* y *Quercus* en 446 sitios permanentes de investigación forestal ubicados en bosques mixtos e irregulares en el estado de Durango.

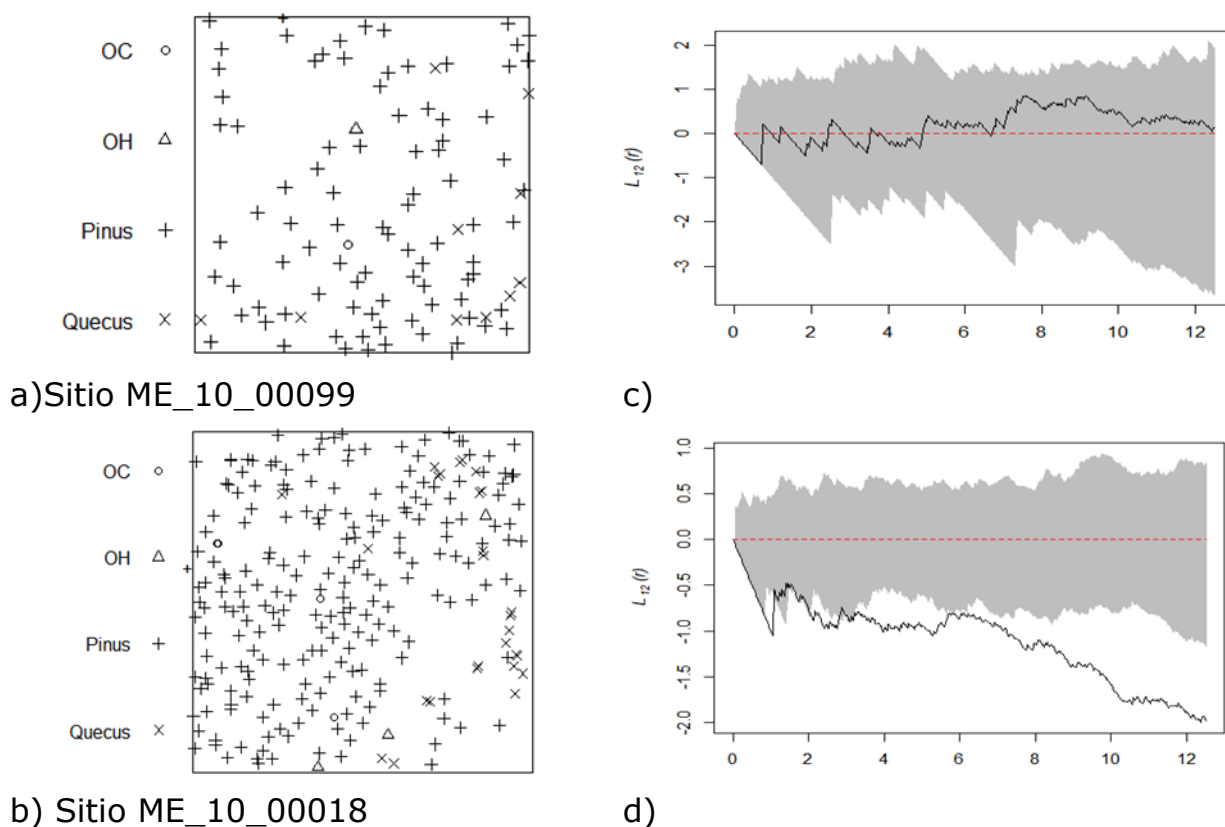
<b>Escala (m)</b>	<b>Atracción (%)</b>	<b>Aleatorio (%)</b>	<b>Repulsión (%)</b>	<b>Total</b>
0 a 2	1.04	87.82	11.14	100
2 a 4	3.63	89.64	6.74	100
4 a 6	7.25	83.94	8.81	100
6 a 8	11.40	80.57	8.03	100
8 a 10	13.21	76.42	10.36	100
10 a 12	13.47	75.91	10.62	100

También se registraron sitios con repulsión en todas las distancias evaluadas; por ejemplo el sitio ME\_10\_00018, donde  $L_{12}(r)$  fue menor que el límite inferior del intervalo de confianza definido para un patrón independiente de las marcas de los puntos en todas las distancias evaluadas.

Los resultados evidenciaron la dominancia de un patrón de independencia entre la posición de los individuos de *Pinus* y *Quercus*, ya que se distribuyeron, principalmente, de manera aleatoria. De acuerdo con Chen y Bradshaw (1999) esta condición es propia de bosques mixtos en fases de madurez o que son de segundo crecimiento, como ocurre en la mayoría de los sitios estudiados. Los casos de atracción entre los árboles de *Pinus* y *Quercus* aumentan con relación a la distancia, y puede ser atribuida a la existencia de procesos poco eficientes de dispersión de semilla (Stoyan y Penttinen, 2000).

Rozas y Camarero (2005) señalan que la función  $L_{12}(r)$  es una herramienta muy útil en ecología forestal, ya que con ella es posible estudiar el papel de la coexistencia entre especies.

En la Figura 3 se muestran los resultados de la función  $L_{12}(r)$  bivariada de Ripley para dos de los sitios analizados, con la finalidad de evaluar interacciones espaciales entre los individuos de pino y encino.



Estimación de  $L_{12}(r)$  (línea continua) a escalas de 0 a 12 m. La sombra gris representa el límite inferior y superior del intervalo de confianza generado con un nivel de confianza del 95 % a partir de 199 simulaciones aleatorias. La imagen a) muestra independencia entre los individuos de los géneros pino (+) y encino (x) (ME\_10\_00099), y b) repulsión (ME\_10\_00018).

**Figura 3.** Resultados de la función  $L_{12}(r)$  bivariada, se observa la interacción que existe entre los individuos de pino y encino en dos sitios característicos del área de estudio (a y b).

## Diferenciación dimensional

Se evidenció la dominancia de un patrón independiente en los tamaños del diámetro de los árboles (90 % de los sitios en promedio), en todas las distancias estudiadas. La curva estimada se mantuvo dentro del intervalo de confianza definido para un patrón de marcas independiente para cada sitio,  $Kmm(r) = 1$  (Cuadro 4). Este resultado señala que en los sitios de investigación es común observar árboles distribuidos de todas las categorías diamétricas ( $>7.5$  cm DAP), sin que existan casi atracciones o inhibiciones significativas a las escalas evaluadas.

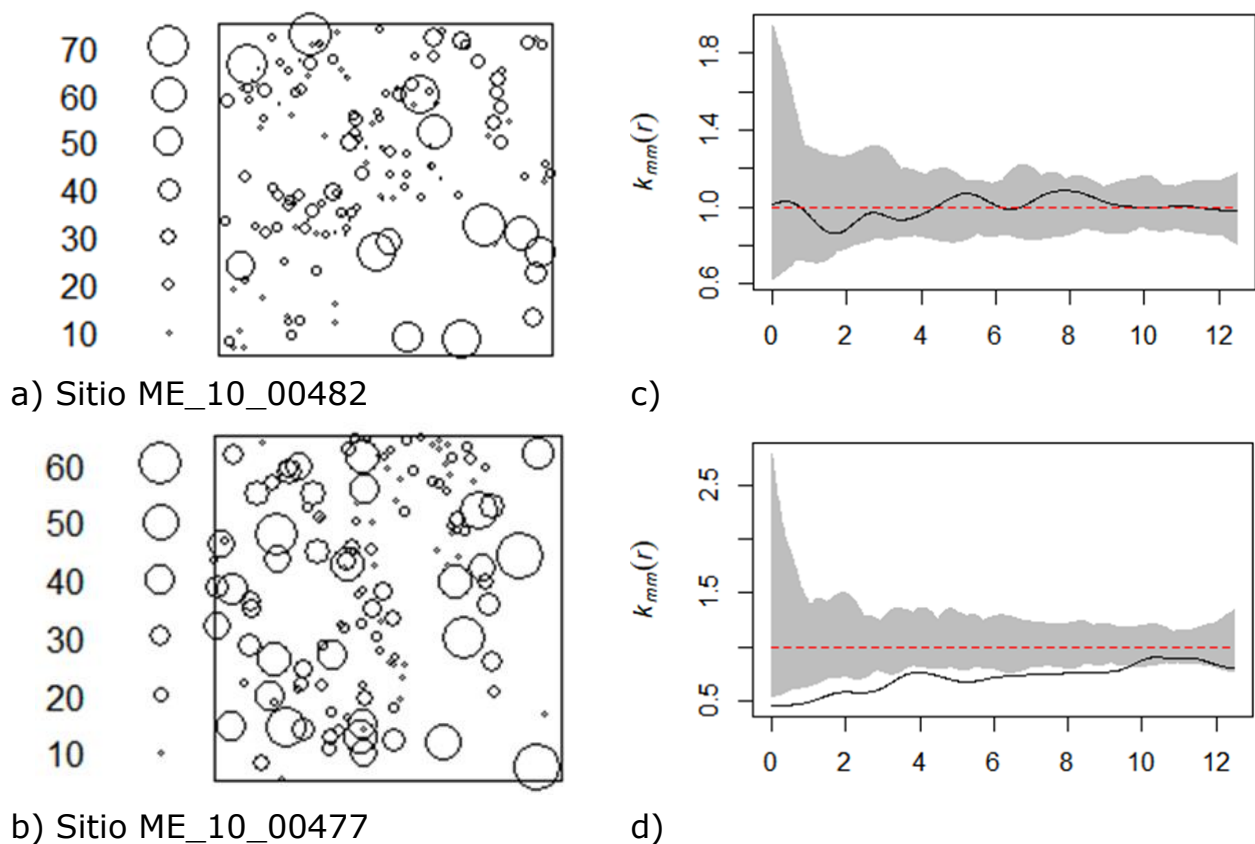
**Cuadro 4.** Resultados de la función de correlación de marcas  $Kmm(r)$  utilizada para investigar interacciones en los tamaños de los diámetros de los árboles en 446 sitios permanentes de investigación forestal, ubicados en los bosques mixtos e irregulares del estado de Durango.

<b>Escala (m)</b>	<b>Atracción (%)</b>	<b>Aleatorio (%)</b>	<b>Repulsión (%)</b>	<b>Total</b>
0 a 2	0.00	79.35	20.65	100
2 a 4	0.00	85.57	14.43	100
4 a 6	0.50	89.80	9.70	100
6 a 8	0.75	92.54	6.72	100
8 a 10	0.50	95.77	3.73	100
10 a 12	1.00	97.01	1.99	100

En algunos sitios se obtuvo una correlación negativa ( $Kmm(r) < 1$ ) a escalas de 0 a 4 m, lo cual indica repulsión significativa entre los individuos, ocasionada por la existencia de competencia por espacio de crecimiento entre ellos. Por otra parte,

solo en casos muy aislados se observaron atracciones positivas entre los diámetros de los árboles ( $K_{mm}(r) > 1$ ), a distancias mayores de 4 metros.

Respecto a los valores obtenidos con la función de correlación de marcas  $K_{mm}(r)$ , para dos sitios, se observó que los árboles de diferentes tamaños se mezclaron de manera independiente dentro del sitio de muestreo (ME\_10\_00352) y en otro la repulsión fue significativa (ME\_10\_00477) (Figura 4).



La línea continua representa la  $K_{mm}(r)$  estimada. La línea punteada muestra el valor teórico de la distribución aleatoria y la sombra gris representa el intervalo de confianza para un patrón independiente de marcas. a) Muestra un ejemplo de independencia entre el tamaño de los diámetros de los individuos y b) un ejemplo de una repulsión significativa.

**Figura 4.** Función de correlación para dos sitios, a partir del diámetro de los árboles como marca característica.



De acuerdo con Soto *et al.* (2010) una correlación aleatoria entre las dimensiones de los diámetros es característica de bosques irregulares, ya que los árboles con dimensiones variadas tienden a distribuirse de esta manera. Por otra parte, algunos autores han descrito correlaciones negativas a escalas pequeñas en bosques mixtos templados, como resultado del proceso de competencia que impone una distancia mínima entre los individuos (Szwagrzyk y Czerwczak, 1993; Réjou *et al.*, 2011).

## **Conclusiones**

El uso de herramientas estadísticas de segundo orden permite caracterizar de manera detallada la estructura espacial de los bosques mixtos e irregulares del estado de Durango. Los resultados indican que los patrones de distribución espacial de los árboles son de forma agrupada y aleatoria. Sin embargo, a escalas mayores a 2 m domina una tendencia de agrupamiento, mientras que con menos de 2 m predomina una de tipo aleatorio. El análisis de correlación de marcas indica que los pinos y encinos se distribuyen de manera independiente en la mayoría de los sitios; mientras que para el caso del análisis de correlación entre los diámetros de los árboles, la dominancia corresponde a un patrón de distribución independiente.

## **Agradecimientos**

Se agradece al Conacyt por el financiamiento otorgado al primer autor para estudiar en el programa de Maestría Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad Juárez del Estado de Durango. A la Conafor por facilitar los datos de los sitios de estudio.



## **Conflicto de interés**

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## **Contribución por autor**

Gustavo Alfredo Chávez-Flores: análisis de datos y elaboración del manuscrito; José Javier Corral-Rivas: coordinación de las revisiones y análisis estadístico; José Daniel Vega-Nieva y Pablito Marcelo López-Serrano: revisión del manuscrito; Ernesto Alonso Rubio-Camacho: análisis estadístico y revisión del manuscrito.

## **Referencias**

Aguirre-Calderón, O. A. 2002. Índices para la caracterización de la estructura arbórea del ecosistema forestal. *Ciencia Forestal en México* 27(92): 5-27.

Aguirre-Calderón, O. A., G. Hui, K. V. Gadow and J. Jiménez-Pérez. 2003. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management* 183(1): 137-145. Doi:10.1016/S0378-1127(03)00102-6.

Ávila-Flores, D., M. González-Tagle, J. Jiménez-Pérez y O. A. Aguirre-Calderón. 2014. Efecto de la severidad del fuego en las características de la estructura forestal en rodales de coníferas. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20(1):33-45. Doi:10.5154/r.rchscfa.2013.01.005.

Baca, J. M. 2000. Caracterización de la estructura vertical y horizontal en bosques de pino-encino. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, NL., México. <http://eprints.uanl.mx/7749/1/1020136368.PDF> (23 de mayo de 2019).

Baddeley, A. and R. Turner. 2005. Spatstat: An R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software* 12: 1-42 Doi:10.18637/jss.v012.i06.

Castellanos-Bolaños, J. F., E. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón y J. Jiménez-Pérez. 2010. Diversidad arbórea y estructura espacial de bosques de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2):39-52. Doi:10.29298/rmcf.v1i2.636.

Chen, J. and G. Bradshaw. 1999. Forest structure in space: a case study of an old growth spruce-fir forest in Changbaishan Natural Reserve, China. *Forest Ecology and Management* 120(3):219–233 Doi:10.1016/S0378-1127(98)00543-X.

Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2013. Guía para el establecimiento, seguimiento y evaluación de Sitios Permanentes de Monitoreo en Paisajes Productivos Forestales. Conafor. México, D.F., México. 93 p.

Corral-Rivas, J. J., B. Vargas, C. Wehenkel, O. A. Aguirre, J. G. Álvarez y A. Rojo. 2009. Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del Estado de Durango. Editorial Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, Dgo., México. 81 p.

De la Cruz, M. 2008. Métodos para analizar datos puntuales. Departamento de Biología Vegetal. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola. Madrid, España. 75 p.

De la Cruz, M. 2013. Avances en el análisis espacial de datos ecológicos: aspectos metodológicos y aplicados. ECESPA-Asociación Española de Ecología Terrestre. Móstoles, Madrid, España. 355 p.

Diggle, P. J. 1983. *Statistical analysis of spatial point patterns*. Academic Press. London, UK. 148 p.

Hernández, F., C. Navarro-Mata, R. Peña-Montañez y A. Nájera-Luna. 2018. Patrón de distribución espacial de las especies arbóreas de la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales* 9(47):169-186. Doi:10.29298/rmcf.v9i47.161.

Kint, V., V. Meirvenne, L. Nachtergale, G. Geuden and N. Lust. 2003. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: A comparison between nearest- neighbour indices and variogram analysis. *Forest Science*. 49: 36-49. Doi:10.1093/forestscience/49.1.36.

Martin, M. 1994. Análisis espacial en renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) y rauli (*Nothofagus alpina*). *Ciencia e Investigación Forestal* 8(2):276-300. [https://www.infor.cl/cifor/pdf/cifor8\\_2/CIFOR8\\_2\\_1994.pdf](https://www.infor.cl/cifor/pdf/cifor8_2/CIFOR8_2_1994.pdf) (12 de junio de 2019).

Moeur, M. 1993. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data. *Forest Science* 39(4): 756-775. Doi:10.1093/forestscience/39.4.756.

Mora-Donjuán, C. A., E. Buendía-Rodríguez, E. A. Rubio-Camacho, E. Alanís-Rodríguez y E. J. Treviño-Garza. 2016. Distribución espacial, composición y estructura de un matorral en el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39(1):87-95.

Penttinen, A., D. Stoyan and H. Henttonen. 1992. Marked point processes in forest statistics. *Forest Science* 38(4):806-824. Doi:10.1093/forestscience/38.4.806.

Réjou, M., O. Flores, N. Bourland, J. Doucet, R. Fétéké, A. Pasquier and J. O. Hardy. 2011. Spatial aggregation of tropical trees at multiple spatial scales. *Journal of Ecology* 99(6):1373-1381. Doi:10.1111/j.1365-2745.2011.01873.x.

Ripley, B. 1977. Modelling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 39(2):172-212. <http://www.jstor.org/stable/2984796> (29 de mayo de 2019).

Rozas, V. y J. J Camarero. 2005. Técnicas de análisis espacial de patrones de puntos aplicadas en ecología forestal. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 14 (1): 79-97.

RStudio Team. 2015. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc. Boston, MA, USA. <http://www.rstudio.com/> (29 de mayo de 2019)

Rubio-Camacho, E. A., M. A. González-Tagle, W. Himmelsbach y D. Y. Ávila-Flores. 2017. Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88(1):113-121. Doi:10.1016/j.rmb.2017.01.015.

Ruiz-Aquino, F., J. I. Valdez-Hernández, A. Romero-Manzanares y F. Manzano-Méndez. 2015. Distribución espacial de dos especies de encinos y atributos ecológicos del bosque de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 21(1):67-80. Doi:10.5154/r.rchscfa.2014.05.023.

Secretaria de Recursos Naturales y Medio Ambiente (SRNyMA). 2016. Programa Estratégico Forestal 2030. Gobierno del Estado de Durango. Durango, Dgo., México. 200 p.

Solís-Moreno, R., O. A Aguirre-Calderón, E. J Treviño-Garza, J. Jiménez-Pérez, E. Jurado-Ybarra y J. 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. Doi:10.21829/myb.2006.1221242.

Soto, D. P., C. Salas, P. J Donoso y D. Uteau. 2010. Heterogeneidad estructural y espacial de un bosque mixto dominado por *Nothofagus dombeyi* después de un disturbio parcial. *Revista Chilena de Historia Natural* 83(3):335-347. Doi:10.4067/S0716-078X2010000300002.

Stoyan, D. and A. Penttinen. 2000. Recent application of point process methods in forestry statistics. *Statistical Science* 15: 61–78. Doi:10.1214/ss/1009212674.

Stoyan, D. and H. Stoyan. 1994. *Fractals, random shapes and point fields: methods of geometrical statistics*. John Wiley and Sons. New York, NY, USA. 406 p.

Stoyan, D., S. Kendall and J. Mecke. 1987. Stochastic geometry and its applications. Wiley. London, UK. 582 p.

Szwagrzyk, J. and M. Czerwczak. 1993. Spatial patterns of trees in natural forests of east-central Europe. *Journal of Vegetation Science* 4(4):469–476. Doi:10.2307/3236074.

Vallejo M., I. 2009. Cambios a corto plazo en los patrones de distribución espacial de nueve especies de plantas comunes en un bosque nublado al sur-occidente de Colombia. *Caldasia* 31(1):77-98.

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/36073/37453> (6 de junio de 2019)

Wiegand, T., C. Gunatilleke, I. Gunatilleke and T. Okuda. 2007. Analyzing the spatial structure of a Sri Lankan tree species with multiple scales of clustering. *Ecology* 88(12):3088–3102. Doi:10.1890/06-1350.1.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.