

# Dispersión espacial del arbolado en una cuenca forestal de Tapalpa, Jalisco

Espatial dispersion of the trees in a watershed of Tapalpa, Jalisco

David Arturo Moreno González\*

Campo Experimental Centro – Altos de Jalisco, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

\*Autor para correspondencia: moreno.davidarturo@inifap.gob.mx

## Resumen

El manejo del bosque natural representa primordial importancia ecológica, económica y social para los habitantes de la Sierra de Tapalpa, Jalisco. Para la mejor conservación, aprovechamiento y mejoramiento de este recurso forestal, se requiere profundizar cada vez más en el conocimiento sobre el comportamiento de la dinámica estructural de las masas forestales. La presente investigación se realizó a través de la información tomada en 71 sitios de un muestreo sistemático, realizado en una pequeña cuenca de 912 hectáreas. El objetivo fue describir la estructura horizontal, explorando el patrón de la dispersión espacial del arbolado y la densidad arbórea de las diferentes etapas de desarrollo, desde la más joven hasta la madura. El índice de Clark y Evans ( $I_{CE}$ ), basado en la relación entre la distancia árbol – árbol, se aplicó en tres ejercicios: general, real e ideal. El primer ejercicio proporcionó un amplio rango de densidad, logrando obtener las tres formas básicas de dispersión: aleatoria, agregada y regular. En el segundo ejercicio predominó la dispersión agregada (96%) por ser la más común en la naturaleza. Y, en el tercero, con base a una tarifa propuesta de densidad, también prevaleció la dispersión agregada, por lo que, se considera una perspectiva apropiada para designar las prácticas silvícolas sobre cortas de aclareo y regeneración. De cualquier forma, durante el manejo forestal es conveniente mantener los mismos rasgos distintivos del bosque, procurando la dispersión espacial del arbolado con los valores del  $I_{CE}$  entre 1 y 2.15 para todas y cada una de las etapas de desarrollo.

**Palabras clave:** Bosque de pino, Densidad arbórea, Distancia árbol – árbol, Estructura horizontal.

## Abstract

The management of the natural forest represents fundamental ecological, economic and social importance to the residents of the Tapalpa mountain, Jalisco. For the best conservation, use and improvement of this forest resource, it seeks to deepen the knowledge about the behavior of the structural dynamics of forest masses. The present investigation was carried out through the information taken in 71 plots of a systematic sampling, carried out in small watershed of 912 hectares. The objective was to describe the horizontal structure, by exploring the pattern of the spatial dispersion of the trees and the tree density of the different stages of development, from the youngest to the mature. The Clark and Evans index ( $I_{CE}$ ), based on the relationship between the tree-tree distance, was applied in three exercises: general, real and ideal. In the first, by providing a wide range of density, it was possible to obtain the three basic forms of dispersion: random, aggregate and regular. In the second, the aggregate dispersion predominated (96%) as it was the most common in nature. And, the third, based on a proposed density rate, aggregated dispersion also prevailed, which is why it is considered an appropriated perspective to designate silvicultural practices on thinning and regeneration cuts. In any case, during forest management it is convenient to maintain the same distinctive features of the forest, ensuring the spatial dispersion of the trees with  $I_{CE}$  values between 1 and 2.15 for every and each one of the development stages.

**Keywords:** Pine forest, Tree density, Tree-tree distance, Horizontal structure.

## Introducción

La distribución o dispersión espacial del arbolado es importante para ocupar el terreno y asegurar la continuidad de la especie forestal. La posición de los árboles en todos los rodales del bosque constituye la forma en la que se distribuyen e influyen en los procesos de propagación, establecimiento, crecimiento, competencia y mortalidad, en función del lugar en que se encuentren y la disponibilidad de luz solar, agua y nutrientes del suelo (Camarero y Rozas, 2006). La dispersión espacial presenta tres formas básicas: aleatoria, agregada y regular; en la dispersión aleatoria, cada árbol tiene la misma probabilidad de ocupar un espacio del rodal con independencia en la ubicación de cualquier otro árbol, en este caso, la densidad arbórea se considera apropiada, ya que no es alta y tampoco baja; la dispersión agregada es la más común en la naturaleza, en la que la presencia de un árbol influye en el espacio de otro debido a una densidad alta; y, la dispersión regular, aunque es uniforme, se caracteriza por una baja densidad arbórea, donde predomina la inexistencia de un comportamiento competitivo entre los árboles (Condés y Martínez, 1998; Badii *et al.*, 2011). Rubio *et al.* (2017) utilizaron la prueba de uniformidad de ángulos para comprobar que los árboles comparten el espacio distribuidos aleatoriamente en un bosque mixto del noreste de México. Aunque éste y otros índices se han manejado para detallar el patrón espacial en la estructura horizontal de las masas forestales, entre todos ellos ha sido muy utilizado el de Clark y Evans (1954), quienes lo realizaron con base a la distancia entre un árbol y su vecino más cercano (Condés y Martínez, 1998; Ledo *et al.*, 2012). No obstante, a la fecha no se dispone de información acerca de la dispersión espacial del arbolado por etapa de desarrollo, desde la más joven hasta la madura, considerando que la densidad arbórea interviene como un factor preponderante en el proceso dispersivo. Por lo anterior, el objetivo fue describir la estructura horizontal, mediante la exploración en el patrón de la dispersión espacial y la densidad arbórea de las diferentes etapas de desarrollo del bosque de pino, teniendo como ejemplo una pequeña cuenca forestal de la sierra de Tapalpa, Jalisco. Los resultados serán de amplia

utilidad para enriquecer la experiencia de los poseedores de bosques, silvicultores y profesionales que participan en la elaboración, planeación y operación de los programas de manejo forestal. Así mismo, podrán reforzar la toma de decisiones durante la aplicación periódica de las prácticas silvícolas de aclareo y regeneración, procurando una distribución espacial en combinación con la densidad apropiada para cada una de las etapas de desarrollo en el bosque de pino y, de esta manera, contribuir a la conservación, aprovechamiento y mejoramiento de los recursos forestales.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

La Sierra de Tapalpa es parte del Eje Neovolcánico Transversal en la región centro occidental de México y se localiza a 137 km al Sur de la ciudad de Guadalajara, Jalisco (Figura 1). El estudio se realizó para una pequeña cuenca de esta cordillera, formada por un sistema montañoso con altitud variable de 2020 a 2420 msnm en la zona conocida como “El Carrizal”. Lugar en donde el agradable clima es templado subhúmedo, con lluvias en verano e invierno. Los suelos son de origen volcánico y sustentan una masa arbolada de 912 hectáreas, cubriendo terrenos inclinados con variación en la exposición geográfica, sobre los cuales las especies de pino predominan entre las de encino y otras hojosas. Al tratarse de un bosque regido mediante el Sistema de Manejo Integrado de los Recursos Forestales (SIMANIN), a la fecha de la toma de datos en campo, la mayoría de la estructura arbórea se desplegó como rodales coetáneos en diferentes etapas de desarrollo: regeneración y brinzal (35%), bajo latizal (11%), alto latizal (31%), fustal joven (14%) y fustal maduro (9%) (Moreno, 2017).

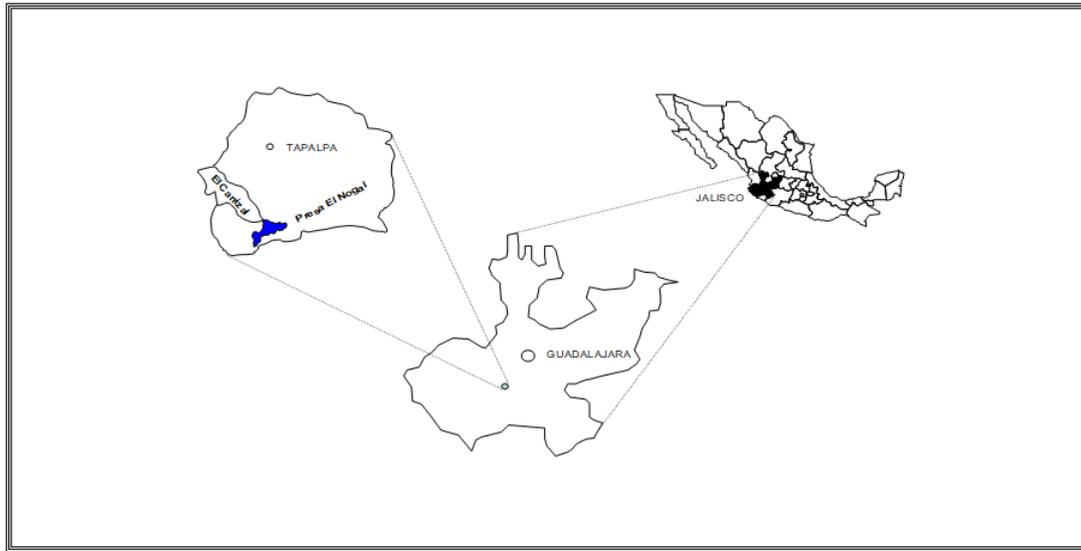


Figura 1. Ubicación de la pequeña cuenca El Carrizal en la cuenca alta de Tapalpa, Jalisco.

### Recolección, procesamiento y análisis de los datos

La información necesaria para el presente estudio, sobre densidad arbórea y distanciamiento entre árboles se tomó de Moreno (2017), quien a su vez la obtuvo de los datos de un muestreo sistemático con intensidad del 0.5%, realizado en febrero de 2003. El cual arrojó 71 sitios circulares de 100 y 600 m<sup>2</sup>, respectivos a las áreas de corta de regeneración y a las masas de arbolado con diámetro mayor a 7.5 cm aún sin intervención. En estas áreas se contaron los árboles, se midió el diámetro normal ( $d_{1.30}$ ) y altura total a los tres pinos vigorosos más cercanos al centro del sitio, representativos de la fase estructural. Al respecto, Moreno (*op. cit.*) clasificó la estructura arborecente de estos sitios de acuerdo al diámetro, como se indica en el Cuadro 1. Asimismo, se calculó la densidad de árboles y se catalogó como excesiva, recomendable y suficiente, con sus correspondientes espacios de crecimiento y distancia promedio entre árboles para cada etapa del desarrollo.

Cuadro 1. Clasificación diamétrica del desarrollo forestal.

Etapa de desarrollo	Clase diamétrica (cm)
Regeneración y brinzal	< 7.6
Monte bravo	7.6 – 12.5
Vardazcal	12.6 – 17.5
Bajo latizal	17.6 – 27.5
Alto latizal	27.6 – 37.5
Fustal joven	37.6 – 47.5
Fustal maduro	> 47.5

### Procedimiento de la exploración descriptiva

Cuando el objetivo sea describir la distribución espacial de la estructura horizontal a escala de vecindad, el índice de Clark y Evans ( $I_{CE}$ ) suele ser el método más utilizado, ya que compara diferentes rodales dentro del bosque (Malleux, 1974; Del Río *et al.*, 2003; Ledo *et al.*, 2012). Este índice es fácil de aplicar y permite cuantificar la desviación de la dispersión aleatoria de los árboles. Se comienza con unas cuantas mediciones de la distancia entre un árbol al azar y su vecino más próximo. Posteriormente, se calcula la distancia media observada ( $d_{mo}$ ), sumando las distancias tomadas entre los árboles aleatorios y sus vecinos más cercanos y, dividiendo el total entre el número de distancias tomadas en el sitio de muestreo. Después se divide entre la distancia media esperada ( $d_{me}$ ) que representa la densidad arbórea de esta área, es decir, la cantidad de árboles por unidad de superficie. En tal sentido, el  $I_{CE}$  se obtuvo dividiendo la distancia media observada entre la distancia media esperada para cada etapa de desarrollo del bosque, expresado de la forma siguiente:

$I_{CE} = d_{mo}/d_{me}$ . Las fórmulas para calcular estas distancias son:

$$d_{mo} = \sum_{i=1}^n r_i / n$$

$$d_{me} = 1/2\sqrt{P}$$

Donde:

r: es la distancia al árbol más cercano desde el árbol aleatorio.

n: es el número elegido de árboles aleatorios.

p: es la densidad del rodal, calculada en árboles por metro cuadrado.

El resultado de esta relación expresa el valor característico con respecto a la forma de dispersión espacial de los árboles en el rodal: aleatoria (1), agregada ( $> 1$ ) y regular ( $< 1$ ).

Cuando el  $I_{CE}$  resulta igual a 1 o tiene un total aproximado a la unidad, entonces la dmo y dme tienen valores parecidos y, por ello, demuestran una estructura horizontal con la dispersión espacial del arbolado de tipo aleatorio. Esto significa que cualquier ubicación en el rodal tiene la misma probabilidad de escoger a cualquiera de los árboles como aleatorio. De tal modo que no se afecta la selección de un árbol aleatorio a la localización de otro. Es decir, cualquiera de los árboles del rodal puede actuar como aleatorio y no hay variación considerable en el valor obtenido del índice.

Si el  $I_{CE}$  es mayor que la unidad, en este caso se trata de una estructura horizontal con dispersión espacial del arbolado de tipo agregada. Esto significa que los árboles se encuentran agregados o agrupados en múltiples espacios distribuidos en todo el rodal.

Finalmente, si el  $I_{CE}$  es menor que 1, entonces se trata de una estructura horizontal con dispersión espacial del arbolado de tipo regular o uniforme, pero con deficiencias en densidad arbórea.

Por lo anterior, el  $I_{CE}$  permite detectar la estructura horizontal del rodal con las clases de distancias que proveen los tipos de dispersión espacial del arbolado.

### **Variables dependientes y adaptaciones al procedimiento exploratorio**

La variación en la distancia árbol-árbol es dependiente de la densidad arbórea por unidad de superficie. Con la intención de verificar este supuesto, se consideró la aplicación de tres ejercicios complementarios: general, real e ideal, como adaptación al procedimiento exploratorio.

General: Se efectuó el ejercicio generalizado con aplicación de un amplio rango de densidad arbórea como pueden ser: excesiva, recomendable, suficien-

te y deficiente. Las cifras propuestas de densidad se consideraron para la fracción correspondiente a la densidad media esperada (dme) de la fórmula de Clark y Evans, mientras la porción proporcionada a la densidad media observada (dmo) se planteó de un metro de distanciamiento entre árboles por tratarse de la etapa de desarrollo más joven del bosque.

Real: El ejercicio realizado se cubrió con la información original que fue recabada en los sitios de muestreo, abarcando casi todas las etapas de desarrollo con excepción de monte bravo y vardazcal que en ese momento no estuvieron presentes. La densidad arbórea se caracteriza por ir de más a menos desde la etapa más joven a la madura, mientras que la distancia entre árboles va de menor a mayor, respectivamente. En cualquier caso, se utilizaron los promedios de distancia calculada de la densidad por sitio de muestreo para cada etapa de desarrollo.

Ideal: El ejercicio idealizado se implementó sobre una tarifa de densidad propuesta en Moreno (2017), a la cual le habían sido estimadas las etapas faltantes de monte bravo y vardazcal a partir de los resultados obtenidos sobre pérdida de arbolado en trabajos anteriores.

### **Resultados y discusión**

Un prototipo posible para obtener las tres formas de dispersión espacial: aleatoria, agregada y regular, se alcanzó en el ejercicio general al proporcionar un amplio rango de densidad arbórea, correspondiente a la etapa del desarrollo más joven del bosque de pino, como se puede apreciar en el Cuadro 2. En dicho cuadro se presenta la extensa variación en densidad de regeneración y brinzal, la cual parte desde 100 hasta 20000 arbolitos/hectárea. En trabajos anteriores se han obtenido cifras mucho más altas en plántulas de pino/hectárea, pero el mayor porcentaje muere por causa de factores adversos antes de transcurrir el primer año de vida, aún sin llegar a establecerse (Chacón, 1983; Musalem, 1984; Ruiz *et al.*, 1990; Méndez, 1998). En el ejemplo utilizado, los valores intermedios de la dispersión espacial del arbolado corresponden a la forma aleatoria con el  $I_{CE}$  igual a uno y poco más o menos de la unidad, dentro del intervalo de 0.89 a 1.09. A esta condición concierne la densidad apropiada de 2000 a 3000 arbolitos/hectárea.

Cuadro 2. Índice de Clark y Evans ( $I_{CE}$ ) para el ejercicio general de la dispersión espacial, exclusivo para la etapa joven de regeneración y brinzal.

Densidad (Árboles/Ha)	P (Árboles/m <sup>2</sup> )	dme (1/2√P)	$I_{CE}$ (dmo/dme) (dmo = 1)	Umbral
20000	2.0000	0.35	2.83	Agregada
15000	1.5000	0.41	2.45	
11547	1.1547	0.46	2.15	
10000	1.0000	0.50	2.00	
5000	0.5000	0.71	1.41	
3000	0.3000	0.91	1.09	Aleatoria
2887	0.2887	0.93	1.07	
2500	0.2500	1.00	1.00	
2100	0.2100	1.09	0.92	
2000	0.2000	1.12	0.89	
1800	0.1800	1.18	0.85	Regular
1500	0.1500	1.29	0.77	
1000	0.1000	1.58	0.63	
500	0.0500	2.24	0.45	
100	0.0100	5.00	0.20	

El perfil de dispersión agregada incurre en los índices mayores de 1.09 con densidades excesivas que superan los 3000 arbolitos/hectárea. Mientras tanto, la dispersión regular incide en índices inferiores a 0.89, con densidades de suficientes a deficientes por ser menores a los 2000 arbolitos/hectárea. Se observa que las densidades altas pertenecen a los índices mayores y viceversa, en las densidades bajas recaen los índices menores (Figura 2).

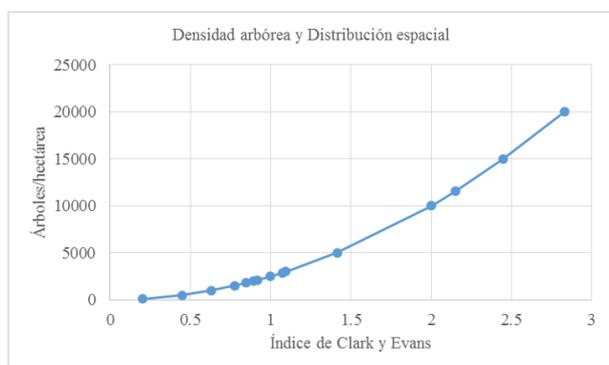


Figura 2. Relación progresiva entre la densidad arbórea (Árboles/hectárea) y la distribución espacial calculada con el índice de Clark y Evans.

Además, cabe mencionar un detalle importante en este ejercicio, se trata de los índices 2 y 2.15, los cuales resultan exactos, esto acontece por los valores proporcionados con relación a la densidad arbórea de 10000 y 11547 arbolitos/hectárea y la distancia media observada (dmo) de 1 metro para ambos; es decir, esta cantidad de árboles por

unidad de superficie representa las distribuciones a marco real y tresbolillo (cuadrados y triángulos equiláteros) con una distancia entre ellos de un metro. Aunque es conveniente señalar que la triangular se considera la distribución que mayormente se asemeja a la condición natural, ya que el total de arbolitos cubre la superficie del rodal de la forma más completa y uniforme posible.

De acuerdo al ejercicio real predominó la dispersión agregada por ser la más común en la naturaleza, como puede apreciarse en el Cuadro 3. En dicho cuadro se muestra la distancia media observada para cada etapa de desarrollo, compuesta por sitios con diferentes niveles de densidad arbórea.

Cuadro 3. Índice de Clark y Evans ( $I_{CE}$ ) para el ejercicio real de la dispersión espacial.

Etapa de desarrollo	dmo	Densidad (Árboles/Ha)	P (Árboles/m <sup>2</sup> )	dme (1/2√P)	$I_{CE}$ (dmo/dme)	Umbral
Regeneración y brinzal	2.67	3800	0.3800	0.81	3.29	Agregada
		3000	0.3000	0.91	2.92	
		2700	0.2700	0.96	2.77	
		1300	0.1300	1.39	1.92	
		1200	0.1200	1.44	1.85	
		800	0.0800	1.77	1.51	
		700	0.0700	1.89	1.41	
		300	0.0300	2.89	0.92	Aleatoria
Bajo latizal	5.31	650	0.0650	1.96	2.70	Agregada
		533	0.0533	2.16	2.45	
		433	0.0433	2.40	2.21	
		333	0.0333	2.74	1.94	
		283	0.0283	2.98	1.79	
Alto latizal	6.13	583	0.0583	2.07	2.96	Agregada
		333	0.0333	2.74	2.24	
		317	0.0317	2.81	2.18	
		183	0.0183	3.70	1.66	
		167	0.0167	3.87	1.58	
		150	0.0150	4.08	1.50	
Fustal joven	8.42	267	0.0267	3.06	2.75	Agregada
		183	0.0183	3.70	2.28	
		150	0.0150	4.08	2.06	
		133	0.0133	4.33	1.94	
		83	0.0083	5.49	1.53	
		67	0.0067	6.10	1.38	
Fustal maduro	7.31	300	0.0300	2.89	2.53	Agregada
		200	0.0200	3.53	2.07	
		150	0.0150	4.08	1.79	

Solamente la densidad más baja de la etapa de regeneración y brinzal obtuvo un  $I_{CE}$  de 0.92, cifra correspondiente a la forma de distribución aleatoria por estar cercana a la unidad; es decir, la distancia media observada (2.67) y la distancia media esperada (2.89) difieren muy poco. El índice 2.18 de la etapa de alto latizal es el que más se acerca a la distribución a tresbolillo con 317 árboles/hectárea y un distanciamiento entre árboles de 6.13 m. Mientras que los índices 2.06 y 1.94 de la etapa de fustal joven y 2.07 de fustal maduro son los que más se acercan a la distribución a marco real con densidad de 133 a 150 árboles/hectárea distanciados a 8.42 m para los primeros y 200 árboles/hectárea espaciados a 7.31 m para el segundo. La distancia media entre árboles, obtenida para cada etapa de desarrollo, donde los valores del  $I_{CE}$  superan la unidad y se elevan conforme aumenta la densidad arbórea, determinando la categoría de la distribución espacial agregada que predomina en la naturaleza (Figura 3).

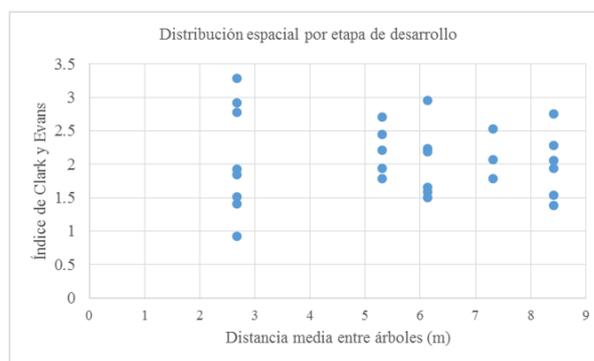


Figura 3. Variación de la distribución espacial calculada con el índice de Clark y Evans, utilizando la distancia media entre los árboles de las diferentes densidades.

Del mismo modo, la distribución espacial agregada predominó en el ejercicio ideal como se presenta en el Cuadro 4. Por lo que, se aprecia exclusivamente la distancia media observada (dmo) para tres cifras de densidad arbórea: excesiva, recomendable y suficiente de cada etapa de desarrollo y la corta de regeneración mediante el método de árboles padres. Esta dmo pertenece a la

distancia árbol - árbol correspondiente al límite inferior de una densidad excesiva, representada por un diseño a tresbolillo o triangular como el más parecido a la distribución natural. En este caso, por tratarse de una distancia exacta entre los árboles de la densidad proporcionada para cada etapa de desarrollo, resulta un  $I_{CE}$  con valor aproximado a 2.15.

Cuadro 4. Índice de Clark y Evans ( $I_{CE}$ ) para el ejercicio ideal de la dispersión espacial.

<b>Etapa de desarrollo</b>	<b>dmo</b>	<b>Densidad (Árboles/Ha)</b>	<b>P (Árboles/m<sup>2</sup>)</b>	<b>dme (1/2√P)</b>	<b>ICE (dmo/dme)</b>	<b>Umbral</b>
Regeneración y brinjal	2	2887	0.2887	0.93	2.15	Agregada
		1282	0.1282	1.40	1.43	
		721	0.0721	1.86	1.07	
Monte bravo	3	1283	0.1283	1.39	2.15	
		721	0.0721	1.86	1.61	
		461	0.0461	2.33	1.29	
Vardazcal	4	722	0.0722	1.86	2.15	
		461	0.0461	2.33	1.72	
		320	0.0320	2.79	1.43	
Bajo latizal	5	462	0.0462	2.33	2.15	
		320	0.0320	2.79	1.79	
		179	0.0179	3.74	1.34	
Alto latizal	6	321	0.0321	2.79	2.15	
		179	0.0179	3.74	1.60	
		114	0.0114	4.68	1.28	
Fustal joven y maduro	8	180	0.0180	3.73	2.15	
		114	0.0114	4.68	1.71	
		79	0.0079	5.62	1.42	
Árboles padres	16	45	0.0045	7.45	2.15	
		19	0.0019	11.47	1.39	
		10	0.0010	15.81	1.01	

Es evidente que la totalidad de cifras con densidad excesiva y recomendable de la tarifa propuesta en Moreno (2017) se reflejó con una distribución agregada, lo que resulta ventajoso para aplicar prácticas silvícolas sobre cortas de aclareo y regeneración. Solamente hubo dos índices de distribución espacial aleatoria que corresponden a la densidad suficiente, uno de regeneración y brinjal (1.07) y el otro de árboles padres (1.01), pero ninguno de distribución espacial regular que sería la más representativa de las deficiencias en densidad arbórea.

A continuación se muestra la distancia media entre árboles, propuesta para cada etapa de desarrollo, con un intervalo del  $I_{CE}$  ente 1 y 2.15 para el manejo apropiado de la densidad arbórea (Figura 4).

En general, la dispersión espacial de los árboles en los rodales se presentó de manera irregular, ésta forma geométrica de la naturaleza se considera como fractal por algunos autores forma geométrica de la naturaleza se considera como fractal por algunos autores (Zeide, 1991; Lorimer *et al.*, 1994; Camarero y Rozas, 2006). El fractal fue definido como una forma de extraordinaria fragmentación y sinuosidad que repite su aspecto a distintas escalas (Mandelbrot, 1975, 1983). Para el caso particular, puede decirse que se trata de un fractal dinámico tipo espacio – temporal, que se caracteriza por la repetición similar de la estructura horizontal, la que a través del tiempo muestra una escala creciente en cuanto a espacio, pero decreciente en densidad arbórea para cada etapa del desarrollo, donde los árboles dominantes logran invadir el espacio de sus

competidores hasta sacarlos de la competencia. En este caso, los árboles no presentan una distribución geométrica como las conocidas en forma triangular, cuadrada, rectangular o hexagonal. Por lo contrario, la dispersión espacial es naturalmente al azar y se mantiene así desde la caída de la semilla, establecimiento, crecimiento, competencia y mortalidad de los árboles en el bosque, con la única discrepancia en densidad arbórea, la cual se distingue cada vez más disminuida desde la etapa más joven de regeneración y brinzal hasta la madura de fustal.

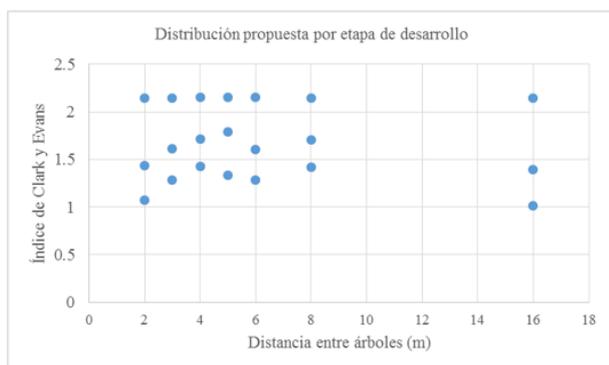


Figura 4. Rango de la distribución espacial calculada con el índice de Clark y Evans, proponiendo la distancia entre los árboles de las diferentes densidades.

De lo anterior, se deduce que en la dispersión aleatoria de las semillas aladas de los pinos se esparcen invariablemente al azar a ciertas distancias, dependiendo de la altura de los árboles semilleros, la fuerza del viento y las características topográficas del lugar.

En la dispersión agregada, también se diseminan al azar, aunque por algunas circunstancias la caída de la semilla se concentra más en unas áreas del terreno que en las otras.

En la dispersión regular, la propagación de la semilla también es al azar, pero su producción, germinación y establecimiento de las plántulas se da en menor cantidad, provocando que los árboles crezcan mayormente distanciados.

### Conclusiones

La relación entre la distancia media observada (dmo) con la distancia media esperada (dme) obtenida a partir de la densidad arbórea, se ha utilizado como un indicador de la distribución de los árboles en el rodal. De esta forma, el  $I_{CE}$  permi-

tió describir la estructura horizontal, a través de la exploración de la dispersión espacial y la densidad del arbolado de una pequeña cuenca forestal en la sierra de Tapalpa, Jalisco.

La extensa variación de la densidad, utilizada para la etapa de regeneración y brinzal en el ejercicio general, funcionó de forma ejemplar para expresar las tres formas existentes de la dispersión espacial. Normalmente, los árboles se dispersan de manera aleatoria; sin embargo, este tipo de propagación en combinación con una cantidad mayor o menor de árboles da lugar a la expansión agregada y regular, en ese orden.

En el ejercicio real, los árboles de las diferentes etapas de desarrollo, encontradas en la pequeña cuenca de El Carrizal, mostraron una forma de dispersión espacial casi en su totalidad agregada (96%), con el resultado se comprueba que este modo de dispersión espacial del arbolado es el más común en la naturaleza. La competencia natural que cada árbol ejerce por el espacio es la principal característica de este tipo de estructura horizontal. En este bosque de pino, cada uno de los árboles influye en el espacio del otro debido a la elevada densidad arbórea.

El ejercicio ideal sobre una tarifa de densidad propuesta considera la perspectiva apropiada para el manejo forestal. En el cual conviene aplicar las prácticas silvícolas sobre cortas de aclareo y regeneración protegiendo las mismas características de un bosque con geometría fractal; es decir, se parte de una estructura horizontal con distribución espacial del arbolado de forma agregada, modalidad que debe continuar con una cuidadosa disminución de la densidad arbórea. Por lo tanto, de acuerdo al resultado del presente ejercicio, es conveniente aplicar la tarifa de densidad siempre y cuando se conserve una distribución espacial del arbolado con el  $I_{CE}$  entre 1 y 2.15, procurando el rango apropiado de espaciamiento entre árboles para cada etapa de desarrollo.

El análisis de la variación de los índices obtenidos de la dispersión espacial del arbolado en las diferentes etapas de desarrollo, resulta un método eficaz para derivar los efectos que ocasiona la competencia natural por el espacio sobre la estructura horizontal en el bosque de pino.

**Literatura citada**

- Badii, M. H., A. Guillen, E. Cerna y J. Landeros. 2011. Dispersión espacial; el prerrequisito esencial para el muestreo. *Daena: International Journal of Good Conscience* 6(1): 40-71. Disponible en <http://www.spentamexico.org/v6-n1/40a71.pdf> (consultado el 18 de marzo de 2020)
- Camarero, J. J. y V. Rozas. 2006. Técnicas de análisis espacial de patrones de superficies y detección de fronteras aplicadas en ecología forestal. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 15(1): 66-87 (publicación en línea). Disponible desde internet en <https://recyt.fecyt.es/index.php/1A/article/view/2252-Article9.20Text-3857-1-10-20081027.pdf> (consultado el 11 de febrero de 2020)
- Condés, S. y J. Martínez M. 1998. Comparación entre los índices de distribución espacial de árboles más usados en el ámbito forestal. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 7(1 y 2): 173-187. Disponible en <https://core.ac.uk/reader/229491110> (consultado el 11 de febrero de 2020)
- Clark, P. J. and F. C. Evans. 1954. Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology* 35: 445-453. Disponible desde internet en <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1931034>
- Chacón S., J. M. 1983. Regeneración mediante árboles padres de *Pinus arizonica*. *Revista Ciencia Forestal* 8(42): 3-20.
- Del Río, M., F. Montes, I. Cañellas y G. Montero. 2003. Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 12: 159-176. Disponible en internet <https://recyt.fecyt.es/index.php/1A/article/view/2490-Article%20Text-4137-1-10-20081103.pdf> (consultado el 11 de febrero de 2020)
- Ledo, A., S. Condés y F. Montes. 2012. Revisión de índices de distribución espacial usados en inventarios forestales y su aplicación en bosques tropicales. *Revista Peruana de Biología* 19(1): 113-124 (publicación en línea). Disponible desde internet en <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/rpb/article/view/799/636> (consultado el 7 de febrero de 2020)
- Lorimer, N. D., R. G. Haight, R. A. Leary. 1994. The fractal forest: fractal geometry and applications in forest science. General Technical Report NC-170. St. Paul, MN. USDA. Forest Service. North Central Forest Experiment Station. 43 p. Disponible en internet <https://www.fs.usda.gov/treeearch/pubs/10234> (consultado el 2 de abril de 2020)
- Malleux O., J. 1974. Análisis de dispersión de 10 especies forestales de un bosque húmedo tropical. *Revista Forestal del Perú* 5(1-2): 1 – 12 (publicación en línea). Disponible desde <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1094/1044> (consultado el 18 de marzo de 2020)
- Mandelbrot, B. B. 1975. Les objets fractales; forme, hasard et dimension. Ed. Flammarion. París, Francia. 190 p. Disponible desde internet en <https://www.amazon.com/-/es/Benoit-B-Mandelbrot/dp/2082106470> (consultado el 2 de abril de 2020)
- Mandelbrot, B. B. 1983. The fractal geometry of nature. W. H. Freeman. 2d Ed. New York, NY. 468 p. Disponible desde internet en <https://www.amazon.com/-/es/Benoit-B-Mandelbrot/dp/0910321647> (consultado el 2 de abril de 2020)
- Méndez H., J. 1998. Evaluación de patrones de regeneración de *Pinus patula* Schl et Cham. en la región de Zacualtipan, Hidalgo. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. México. 65 p.
- Moreno G., D. A. 2017. Tarifa de densidad para el manejo de arbolado en bosques de pino. Campo Experimental Centro – Altos de Jalisco. CIRPAC – INIFAP. México. (Documento Interno)
- Musalem S., M. A. 1984. Effect of environmental factors on regeneration of *Pinus montezumae* Lamb., in a temperate forest of México. Ph. D. Dissertation. Yale

- University. New Haven, CT. USA. 262 p.
- Rubio C., E. A., M. A. González T., W. Himmelsbach, D. Y. Ávila F., E. Alanís R., y J. Jiménez P. 2017. Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88: 113-121. Disponible desde internet en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42549957011> (consultado el 30 de enero de 2020)
- Ruiz G., A., J. R. Barrios E. y J. J. González C. 1990. Observaciones sobre algunos factores que limitan el establecimiento de la regeneración natural en bosques de pino en Calpulalpan, Tlaxcala. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. México. 150 p.
- Zeide, B. 1991. Fractal geometry in forestry applications. *Forest Ecology Management* 46(3-4): 179-188 (publicación en línea). Disponible desde internet en <https://www.sciencedirect.com/science//article/abs/pii/037811279190230S>