

Diseños Nelder en la investigación forestal: Una revisión

Nelder Designs in Forestry Research: A Review

Jesús Mao Estanislao Aguilar-Luna

Complejo Regional Norte - Sede Tetela,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
Barrio Benito Juárez, Tetela de Ocampo, Puebla (México, C.P. 73640).
Correo de correspondencia: mao.aguilar@correo.buap.mx

Resumen

En este documento se discute sobre los diseños Nelder utilizados en la investigación forestal desde 1962 hasta la actualidad. Estos diseños tienen una forma circular, semicircular o en cuadrantes y pueden utilizarse en parcelas de tamaño pequeño para evaluar el crecimiento a diferentes densidades de una plantación. Debido a que los tratamientos no son aleatorios, los datos no pueden ser analizados mediante un análisis de varianza tradicional. Otra desventaja de su uso es la mortalidad, la cual puede afectar los datos del árbol perdido y de los cuatro adyacentes; por lo cual se debe reducir el efecto procurando la replicación del diseño y en etapas tempranas del experimento hacer replantación.

Palabras clave

Densidad de plantación, arreglo espacial, onda de densidad, efecto de borde.

Abstract

This paper discusses the Nelder designs used in forestry research from 1962 to the present. These designs have a circular, semicircular or quadrant shape and can be used on small plots to evaluate a plantation's growth at different densities. Because the treatments are not random, the data cannot be analyzed by traditional analysis of variance. Another disadvantage of its use is mortality, which can affect the data of the lost tree and the four adjacent ones; therefore, the effect must be reduced by seeking replication of the design and, in the early stages of the experiment, replanting.

Keywords

Planting density, spatial arrangement, density wave, edge effect.

Introducción

Nelder (1962) publicó una descripción de diseños de plantación compactos que permitían estudiar el espacio de crecimiento en plantas hortícolas en la estación de investigación Rothamsted del Reino Unido. Estos diseños se han adaptado a lo largo de los años para evaluar principalmente el efecto del espaciamiento en el crecimiento de árboles, estableciéndose en un gran número de países. Las características de este diseño incluyen una sola parcela (circular, semicircular o en cuadrante), donde el espacio físico para el crecimiento es sistemático (aumenta o disminuye a partir del origen).

Desde una vista aérea el diseño de plantación Nelder parece una rueda con radios; está conformado por una serie de círculos concéntricos que parten desde el centro. El diseño más comúnmente utilizado es el circular y se caracteriza por tener ángulos iguales entre los radios y una distancia geoméricamente creciente entre los arcos, desde el centro y hacia fuera; en él, los árboles se plantan en cada intersección de radios y arcos (Nelder, 1962; Aguilar-Luna *et al.*, 2011).

Con excepción de los sitios más externos en los radios y los arcos, el efecto del borde se minimiza porque las plantas de cada arco muestran sólo ligeras diferencias en el espacio de crecimiento en comparación con las de los arcos vecinos. Aunque los árboles tienen que ser plantados en las intersecciones de arcos y radios, los tratamientos en este diseño no son complicados y tienen la virtud de reducir el área experimental, sobre todo si se compara con otros diseños de plantación, donde las parcelas son diseñadas por separado, sin que se reduzca el nivel de significancia (Pretzsch, 2011).

El diseño en círculos concéntricos Nelder es un diseño experimental que sirve para determinar la distancia de separación óptima entre las especies arbóreas. Este diseño permite realizar trabajos con espaciamentos diferentes (densidades de plantación) en un área relativamente pequeña; pero este pequeño tamaño de las parcelas puede distorsionar los datos del crecimiento debido al efecto de borde, lo cual se ha observado en plantaciones forestales (Zavitkovski, 1982).

Según Redmond *et al.* (2005), algunas de las características generales de los diseños Nelder son: a) la forma de cada espacio de crecimiento es constante y adquiere una forma aproximadamente cuadrangular; b) el tamaño del espacio de crecimiento por planta aumenta desde el centro hasta la periferia; c) todas las plantas a lo largo de un arco, radio o círculo concéntrico, se caracterizan por tener el mismo espacio de crecimiento; d) la información recolectada a lo largo de un arco o de un radio representa una repetición para las diferentes categorías establecidas; e) no es posible la aleatorización de los tratamientos; f) se pueden establecer una o varias repeticiones.

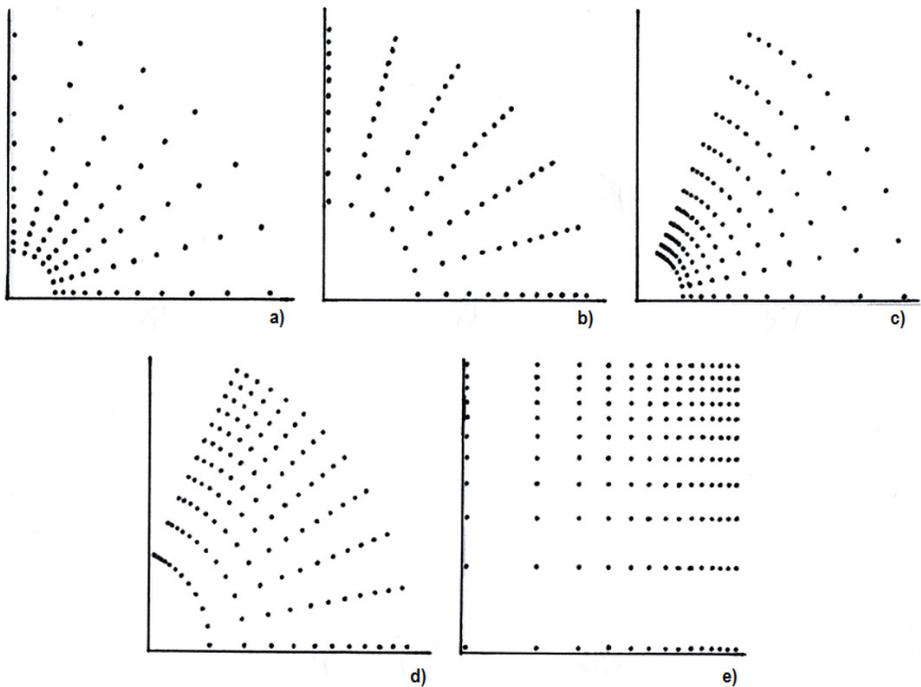
Los diseños Nelder han sido poco utilizados en la investigación agrícola, forestal y agroforestal, con pocos estudios científicos reportados, lo cual puede deberse al escaso conocimiento que se tiene de los mismos, a su pobre entendimiento y su aplicación. Por ello, se tiene como objetivo examinar los hallazgos relacionados con los diseños Nelder donde su aplicación ha sido útil en la evaluación de distintas variables relacionadas con el crecimiento, la productividad y el rendimiento en especies forestales; comparando sus

ventajas y desventajas respecto a otros diseños de plantación y esperando que la presente investigación sirva para motivar aún más su uso.

Diseños sistémicos

Nelder (1962) propuso cuatro diseños sistemáticos para estudiar la relación del espacio de crecimiento en diversas especies, de manera individual o asociada; los cuales están basados en radios y arcos (en círculos concéntricos); además hay un quinto diseño en forma de rejilla logarítmica rectangular (figura 1). Éstos pueden ser utilizados en espacios de área reducida, desde 0.09 ha en adelante (Van Deusen y Bayle, 1991).

Figura 1
Cinco diseños con espaciamiento sistemático.



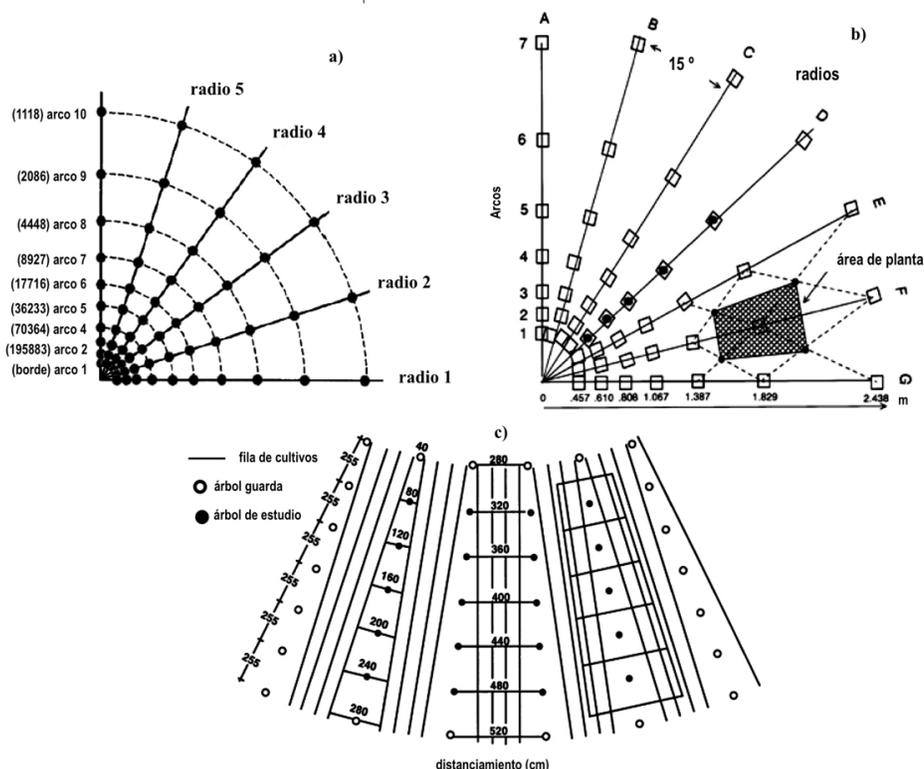
En a) la densidad disminuye cuando la distancia con respecto al origen se incrementa (rectangularidad fija); en b) la rectangularidad disminuye con respecto de la distancia de origen (densidad fija); en c) la densidad cambia horizontalmente mientras la rectangularidad cambia verticalmente; en d) la densidad cambia verticalmente mientras la rectangularidad cambia horizontalmente; en e) la densidad y la rectangularidad cambian a lo largo de ambos ejes, pero en diferente dirección (Affleck, 1998).

En la figura 1, los diseños a y b son los de mayor interés en la investigación forestal y agroforestal por su fácil ejecución; mientras que los diseños c y d son de poco interés en el campo agrícola y forestal (Krinard, 1985; Schlönvoigh y Beer, 2001; Redmond *et al.*, 2005). En el diseño a el área por planta se incrementa conforme aumenta la distancia; los

radios sucesivos están separados por un ángulo constante y los arcos por una progresión geométrica de la distancia radial. El espaciamiento de las plantas es igual dentro del mismo arco, pero se incrementa hacia los arcos externos. La rectangularidad, medida por la relación entre radios y arcos, permanece constante en todo el diseño.

Dos modificaciones son posibles para el diseño a de la figura 1, la primera sirve para evaluar el espaciamiento triangular y la segunda sirve para realizar experimentos con más de una especie. En el diseño b de la figura 1, el ángulo entre los radios y el área por planta permanecen constantes, pero la rectangularidad (forma del espacio físico para el crecimiento) cambia para cada arco, de un patrón cuadrado a uno rectangular conforme se alejan del origen; el incremento de la distancia entre arcos es relativo a la distancia radial (figura 2). En los diseños c y d de la figura 1, tanto el espaciamiento como la rectangularidad cambian en la parcela experimental (Affleck, 1998).

Figura 2
Aplicaciones del diseño Nelder.



En a) el área de influencia se incrementa exponencialmente del centro hacia afuera (Hummel, 2000); en b) la parte sombreada se refiere al espacio de crecimiento de la planta (Ritchie, 1997); en c) su uso potencial en la asociación de árboles con cultivos (Schlönvoigh y Beer, 2001).

Fórmula del espaciamiento

Los diseños Nelder con espaciamiento sistemático son una forma de arreglo espacial con puntos, que representan la posición de una planta; donde el área por planta y la rectangularidad (forma del espacio de crecimiento disponible) cambian de modo sistemático (Nelder, 1962).

Las especificaciones del diseño Nelder se establecen definiendo inicialmente el número de densidades a evaluar (n), incluyendo los bordes y la superficie correspondiente a la densidad más baja (S_1) y más alta (S_n). Por razones prácticas, el ángulo entre radios debe ser un número entero de grados. Las plantas situadas entre los círculos de radio (r_0) y (r_{n+1}) generalmente se utilizan para prevenir el efecto de borde. Si en un mismo círculo se establecieran varias especies, uno o dos radios de separación entre ellas podrían funcionar también como bordes.

La determinación de la tasa de incremento ‘ δ ’, en la superficie de crecimiento sobre el n -ésimo círculo (S_n) a lo largo del radio, es definida por la fórmula:

$$\text{Log } \delta = \log (S_n / S_1) / 2_{n-2}$$

La superficie de crecimiento correspondiente a los siguientes espaciamientos es definida por la fórmula:

$$S_n = \delta^2 S_{n-1}$$

La distancia del origen al primer punto de plantación (r_0), es definida por la fórmula:

$$r_0 = \sqrt{\frac{2}{\mathcal{R}^* (\delta^3 - \delta)}} \chi \sqrt{S_1}$$

Si la disposición de las plantas fuera en cuadro, se define con la fórmula:

$$r_0 = \sqrt{\frac{1}{\mathcal{R}^* (\delta^3 - \delta)}} \chi \sqrt{S_1}$$

Si la disposición de las plantas fuera en triángulo, los radios siguientes se definen por la fórmula:

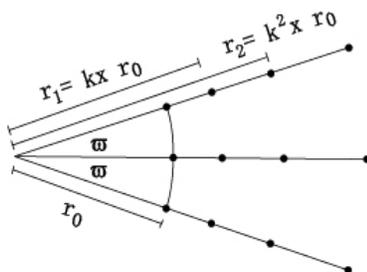
$$r_n = \delta r_{n-1} = \delta_n r_0$$

Parrott *et al.* (2012) indicaron que el diseño sistemático Nelder permite a un investigador forestal probar múltiples densidades de árboles en una sola parcela. Dado que las relaciones espaciales entre los árboles plantados son fundamentales para el diseño, sólo se necesita un conjunto específico de parámetros para establecer una parcela Nelder (figura 3). Tales diseños proporcionan una base de ecuaciones de cálculo para la determinación de los parámetros requeridos, la fórmula se centra en la derivación de estas ecuaciones y su aplicación en la investigación forestal. Varios autores han descrito la utilidad de parcelas Nelder en la investigación forestal (Galinski *et al.*, 1994; Kirongo *et al.*, 2012), pero se ha hecho mediante ecuaciones basadas en trigonometría; sin embargo, las ecuaciones del diseño deben permitir a los investigadores forestales responder la siguiente pregunta:

dadas las distintas densidades de plantación en los árboles, ¿cuáles son las características del diseño Nelder requerido?

Figura 3

Arco con apertura del ángulo entre radios (ω) y radios del arco (r_i).



Fuente: Nelder (1962).

Procedimiento en campo

Los diseños Nelder se dividen con frecuencia (por ejemplo, en cuadrantes) para proporcionar tratamientos variados o repeticiones con la misma especie. Con mayor frecuencia en las parcelas se utilizan de una a tres especies y la misma cantidad de tratamientos. Este tipo de subdivisión puede presentar un problema en la interpretación de los datos si las especies o los tratamientos varían ampliamente en su patrón de crecimiento (Mark, 1983).

Se aplica mejor en situaciones donde las parcelas son relativamente planas (>5% de pendiente), porque si las parcelas se colocan en una pendiente mayor las distancias de separación no representarían realmente las distancias previstas en el diseño. Las parcelas se establecen utilizando mediciones horizontales; por ello, si las parcelas se observaran desde arriba, la interceptación lateral de la energía solar sería mayor y la zona de crecimiento radical disponible sería más grande. Pero si el diseño es visto perpendicularmente a la pendiente, tomaría la forma de una elipse. Esto distorsiona los datos de crecimiento debido a la variada separación, sobre todo si las parcelas se subdividen con diferentes especies o tratamientos.

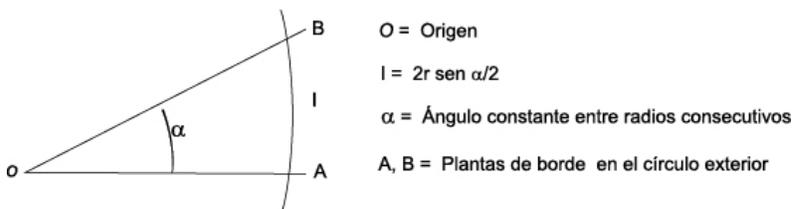
Los sitios deben ser elegidos con cuidado para asegurar la mayor uniformidad edáfico-ambiental posible; además, las técnicas de establecimiento deben ser elegidas para no crear diferencias de sitio (lo que daría lugar a efectos no aleatorios), conformando así los requisitos para el análisis de las técnicas estadísticas utilizadas.

Los diseños con espaciamientos deseados deben ser definidos antes de su establecimiento en campo. El diseño funciona mejor si el espacio o separación radial para la siembra o plantación es aproximadamente la misma que la separación transversal entre los puntos de siembra en los radios; por ello, el diseño requiere un alto grado de precisión. El ángulo entre los radios se debe girar con precisión o la separación entre los puntos de siembra no será exacta. Esto se puede comprobar más fácilmente mediante el marcaje de la distancia entre los radios en el perímetro de la parcela.

Seleccionada la ubicación del área experimental, se coloca un poste fijo que definirá el origen o centro de la misma. Una cuerda o cinta marcada previamente con las distancias requeridas se amarra al poste situado en el origen y se extiende a lo largo del primer radio ' r ' para que gire libremente sobre su eje. Posteriormente, la cuerda es tensada y fijada en posición horizontal al extremo del último círculo con una estaca. Una vez estaquilladas las marcas correspondientes, la cinta colocada en el primer radio es movida para marcar el segundo radio, de tal forma que las marcas finales de estos radios adyacentes distan $2r$ que sean $\alpha/2$, distancia que es marcada con una segunda cuerda ' l '. Una brújula debe ser utilizada para reconfirmar el ángulo ' α ' prefijado; pero, ante la imposibilidad física (por piedras, tocones, suelos poco profundos, sitios mal drenados o en desnivel importante) para establecer una planta en un punto, se recomienda ubicarla lo más cerca posible al punto correspondiente.

Se deben instalar dos radios simultáneamente; para ello, Nelder (1962) sugirió emplear dos cintas marcadas previamente y unidas entre sí por una tercera para definir el ángulo requerido. Si se marca primero la circunferencia exterior, se puede economizar el tiempo, especialmente si se cometen errores en la medición de los ángulos. El uso de la brújula, del telémetro y sistemas de posicionamiento global, aumentan la precisión. Una vez marcada la circunferencia exterior se procede a poner estacas en los puntos exteriores según las marcas de la cinta. La figura 4 resume la explicación de la instalación del diseño, según la figura 1 en el campo y las variables que en ella intervienen.

Figura 4
Triangulación para la instalación del diseño sistemático Nelder figura 1.



Fuente propia.

Experimentación y estadística

Dado que la disposición en campo de la parcela Nelder implica un cambio sistemático en el espacio de crecimiento de los árboles, el diseño no cumple el criterio de aleatoriedad necesario para realizar un análisis estadístico clásico. Van Slyke (1963) propuso que la interacción de los efectos en los sitios y los tratamientos, es decir, donde la separación de un árbol está predeterminada por la separación de otro árbol vecino, puede ser superada mediante la selección cuidadosa de un área experimental homogénea. Esto puede ser útil para evaluar distintas características en los árboles, por ejemplo, altura y diámetro, antes

de que se establezca la competencia en un arco (tratamiento) y haciendo comparaciones de estas mediciones, que mostrarían si hubo efecto por las diferencias de sitio. Si esa etapa de variación fue al azar, un análisis de varianza (ANOVA) podría ser considerado como aceptable para determinar las diferencias en tratamientos.

Otra limitación es la naturaleza no aleatoria de las observaciones para árboles vecinos, lo cual implicaría la presencia de correlación espacial, en comparación con los diseños aleatorios donde todos los arreglos de tratamientos son igualmente probables (Affleck, 1998). Cuando este es el caso, los métodos de análisis clásicos, basados en muestras aleatorias y mínimos cuadrados, no deben ser utilizados para comparar los efectos del tratamiento y las estimaciones sesgadas de los parámetros de la varianza. Sin embargo, la estructura geométrica de los experimentos Nelder presentan una oportunidad para evaluar las propiedades de otros métodos de análisis estadísticos basados en modelos de regresión y correlación (Redmond *et al.*, 2005).

El análisis de correlación espacial podría reemplazar a los métodos estadísticos clásicos; pero debido al gran número de tratamientos (espaciamientos) en estos diseños, el análisis de regresión por el que una variable dependiente (por ejemplo: altura o diámetro) está relacionada con una variable independiente (por ejemplo: espacio de crecimiento) se considera adecuado para el análisis experimental (Krieger, 1998; Hummel, 2000). Estas regresiones pueden ser expresadas gráficamente mediante ecuaciones de regresión lineal, curvilínea o no lineal (función de crecimiento). Por lo cual, hay dificultad al realizar comparaciones entre tratamientos con los diseños Nelder, de manera similar a las comparaciones que se llevan a cabo con los arreglos de tratamientos en forma no Nelder que aplican los principios de aleatorización, replicación y posiblemente bloqueo.

Desde el trabajo de Mark (1983), se ha sugerido que los experimentos deben ser configurados para responder a preguntas generales y no específicas, para seleccionar lo mejor de una serie de tratamientos; por lo cual el análisis de regresión puede ser útil para predecir tales parámetros; por lo que el análisis de varianza (ANOVA) no debe aplicarse a los datos, ya que el diseño es sistemático. Aunque el diseño es estadísticamente menos riguroso que los experimentos aleatorios, proporciona evidencia que apoya a las relaciones tamaño/densidad observadas en las parcelas Nelder para condiciones de mayor interés en diferentes estudios (Hummel, 2000). A pesar de esta limitación, los resultados de tal diseño pueden ser claramente identificados en el terreno y siguen siendo una herramienta muy efectiva para comprender el impacto del espacio de crecimiento en las plantaciones forestales a partir de un área de demostración útil y entendible.

Una limitante para el uso generalizado de este diseño en la experimentación es la falta de aleatorización en los tratamientos y que éstos no son independientes del error experimental (Redmond *et al.*, 2005), por lo que no se pueden establecer relaciones de causa-efecto; sin embargo, los diseños aleatorios introducidos por Fisher tienen algunos usos importantes en los diseños sistemáticos, como el de estimar sin sesgo la varianza del efecto de los tratamientos y sus medias aritméticas. Pero para experimentos con espaciamientos, la aleatorización puede tener desventajas al desear mantener la forma constante del espacio de crecimiento en varias densidades de plantación, de donde resultan parcelas de

diferente tamaño con la dificultad de ponerlas juntas en un solo bloque (Nelder, 1962; Redmond *et al.*, 2005).

De la misma manera, Mora (1999) indicó que en los diseños sistemáticos Nelder no debe utilizarse un ANOVA clásico si se quiere probar el efecto de las densidades de plantación con otro factor adicional, por ejemplo: fertilización, riego, poda, variedades, etcétera. Sin embargo, en no pocos trabajos se ha utilizado el ANOVA como herramienta estadística útil; porque al final, es el criterio del investigador el más importante en la toma de decisiones (Mark, 1983; Knowe y Hibbs, 1996; Imada *et al.*, 1997; Kohli y Saini, 2003; McIvor *et al.*, 2005; Geyer, 2006).

Existen también, otras alternativas estadísticas para el análisis de los datos obtenidos con los diseños Nelder, cuya bondad es que incorporan o pueden incorporar la correlación o covarianza espacial entre observaciones, tales como: el análisis espectral (Renshaw y Ford, 1984), el estadístico multivariado T^2 de Hotelling (Patel y Patel, 1985), el estadístico de Kenward (Kenward, 1987), el análisis de antedependencia (Mora, 1999), los métodos geoestadísticos (Oda-Souza *et al.*, 2008), el modelo de optimización múltiple en superficies de respuesta (Aguilar-Luna *et al.*, 2011) y el REML/BLUP (máxima verosimilitud restringida / mejor predicción lineal no viciada) (Aparecida de Moraes *et al.*, 2013).

Varios investigadores han estudiado las ventajas que involucra su uso en la experimentación agrícola (Eglí, 1988; Tetio-Kagho y Gardner, 1988); sin embargo, no parece existir un acuerdo acerca de los riesgos que implica su aplicación por la falta de aleatorización en los tratamientos (espaciamientos) dentro del círculo, medio círculo o cuadrante. Además, Patel y Patel (1985), Chalita (1991) y Mora (1996) han reportado errores correlacionados y heterocedásticos dentro de la parcela. El estadístico multivariado T^2 de Hotelling puede proveer una metodología de análisis que considera la dependencia de las observaciones; mientras que el estadístico de Kenward, para el análisis de mediciones repetidas en el tiempo, está basado sobre un modelo tipo antedependencia que se ajusta a un análisis de correlación entre los errores (Mora, 1999).

El análisis de antedependencia se trata de una metodología para el análisis de grupos de tratamientos para un conjunto de densidades, asumiendo una estructura de dependencia entre observaciones dentro de las parcelas; lo cual puede resultar más eficiente y apropiado que las pruebas de F calculada vía ANOVA, ya que el método toma en cuenta, la dependencia entre plantas ocupadas sistemáticamente dentro del diseño; y tiene la ventaja de utilizar la técnica del análisis de la covarianza (ANACOVA). Al respecto, Mora (1996) sugirió realizar un análisis de técnicas de estimación, que consideren la correlación espacial de los errores, ya sea para propósitos predictivos y/o para la búsqueda de la densidad de plantación óptima.

El modelo de optimización múltiple en superficies de respuesta, es un predictor muy eficaz del comportamiento de una variable al modificar la densidad de plantación; encontrando una densidad óptima en un momento específico. REML es un método de estimación que se puede usar cuando hay independencia entre observaciones; en tanto

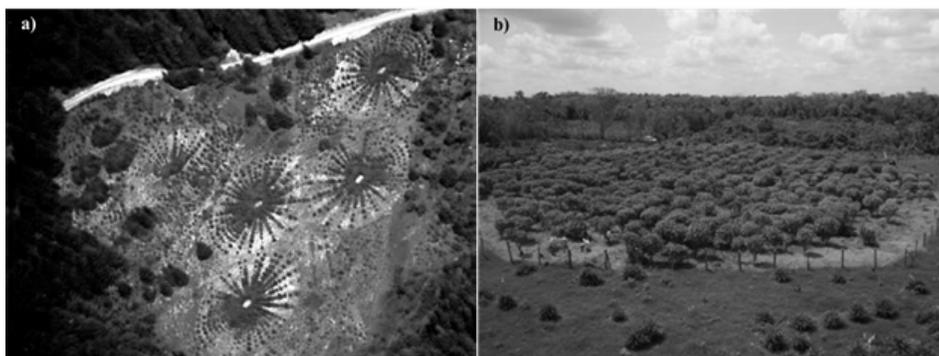
que el BLUP es una propiedad de los predictores de variables aleatorias de un modelo estadístico mixto para la estimación de los efectos aleatorios.

Usos potenciales

Algunas de las variables que se pueden evaluar son: variabilidad genética, competencia inter e intraespecífica, alturas, diámetros, tamaño de copa, índice de vigor, índice de esbeltez, índice de espacio vital, fitosanidad, tasa de crecimiento y porcentaje de supervivencia. Su impacto visual ha satisfecho a diversos investigadores agrícolas, forestales y agroforestales, debido a que el espacio de crecimiento tiene un efecto significativo en las distintas variables de respuesta (figura 5).

La forma, el número de círculos y el número de repeticiones del experimento, pueden ser variables y dependen de las especies utilizadas, el propósito del estudio, la disponibilidad de recursos y la experiencia del investigador (figura 2). Así entonces, el diseño 'Nelder' permite el análisis de diferentes espaciamientos desde áreas reducidas y compactas a extensas; por lo cual se considera una herramienta adecuada para estudios de establecimiento y manejo de plantaciones forestales, especialmente en el caso de latifoliadas (Redmond *et al.*, 2005).

Figura 5
Diseños Nelder circulares.



En a) con *Pseudotsuga menziesii* en Oregón, USA (Redmond *et al.*, 2005); en b) para el sistema agroforestal con cedro, lima y chaya (Aguilar-Luna *et al.*, 2011).

Ventajas y desventajas

El diseño en círculos concéntricos Nelder se debe aplicar cuando la posibilidad de que la tasa de supervivencia sea mayor al 85%. Al igual que en los experimentos con árboles individuales, este diseño es altamente sensible a la mortalidad de los árboles, porque si un árbol muere, no sólo se pierden los datos correspondientes a ese árbol, sino que también se pueden perder o modificar los datos de los cuatro árboles adyacentes; por ello, la muerte

de un árbol altera la disposición del diseño de modo que las distancias de separación no son tal y como se prevén (Mark, 1983; Stape y Binkley, 2010).

De la misma forma, Parrott *et al.* (2012) reportaron que el impacto de la pérdida de un árbol está asociado al carácter espacial del diseño, puesto que la densidad a lo largo de cada arco es dependiente de los árboles del borde; así entonces, la mortalidad afecta también a los árboles vecinos.

Una vez que se reconoce que la mortalidad puede afectar el tamaño de muestra (por el hecho de retirar árboles adyacentes) se debe reducir la mortalidad, procurar la replicación del diseño y si esta situación se presenta en etapas tempranas de experimento, replantar también puede ser una alternativa.

Con respecto del efecto de borde, tanto el primero como el último círculo o arco se pueden utilizar para evitarlo (funcionando como zona de amortiguamiento); por ello, hay que considerar que las plantas en los bordes interior y exterior se pueden comportar como dominantes sobre otras plantas cercanas, puesto que tienen más espacio para desarrollarse. Esta dominancia libera a otras plantas de la competencia, lo que produce una distribución periódica de las plantas dominantes y las suprimidas (Franco y Harper, 1988).

De la misma forma, Zeide (1993) notó que cerca de un árbol dominante por lo general hay un anillo de árboles suprimidos; a su vez, los árboles en el anillo concéntrico siguiente se comportan como dominantes y así sucesivamente. El efecto lo describió como una onda de densidad que se disipa con la distancia y que se propaga en todas direcciones de los árboles dominantes. Franco y Harper (1988) sugirieron que las ondas de densidad se transmiten a lo largo de los radios del círculo Nelder, del centro a los polos, como una interferencia entre plantas cercanas que sigue esta dirección con el tiempo. Por lo que hay una correlación negativa en el crecimiento de las plantas adyacentes a lo largo de los arcos, lo cual sugiere que las ondas de densidad también se transmiten en esta dirección. Por lo tanto, la fuerza de la onda se propaga a lo largo de los radios y oculta la presencia de ondas que se propagan en otras direcciones.

Mark (1983) mencionó que en los diseños Nelder con una sola especie el mismo espaciamiento puede ser observado como un tratamiento; esto es cierto y también aplica para dos o más especies asociadas. Es por ello que el diseño sistemático Nelder es útil en la investigación forestal y agroforestal puesto que permite localizar el tratamiento más adecuado para una asociación de especies; además de mostrar un fuerte impacto visual (figura 5). Tiene sus desventajas, tales como: la dificultad en el uso de maquinaria, la no aleatorización de los tratamientos y la presencia de gradientes sistemáticos ocultos (Franco y Harper, 1988; Zeide, 1993). Este diseño se recomienda con fines de experimentación, con una o varias especies asociadas, mas no para la producción comercial, porque no es el objetivo principal del diseño (Aguilar-Luna *et al.*, 2011).

Estudios forestales

Aunque el diseño Nelder se originó en la investigación agrícola, ha sido utilizado en el sector forestal y agroforestal para investigar, por ejemplo: los patrones no aleatorios de altura en *Pinus sylvestris* (Galinski *et al.*, 1994), el incremento del diámetro y la mortalidad en

Alnus rubra (Knowe y Hibbs, 1996), la competencia inter e intraespecífica en *Pseudotsuga menziesii* y *Alnus rubra* (Newton y Cole, 2006), la relación competencia-densidad en *Pinus pinaster* (Lemoine, 1980) y *Pinus sylvestris* (Spellman y Nagel, 1992); la variación genética en *Jacaranda cuspidifolia* (Aparecida de Moraes *et al.*, 2013); así como el desarrollo de herbáceas en el sotobosque con *Eucalyptus grandis* (Cameron *et al.*, 1994).

Los experimentos se pueden configurar en forma de círculos, medios círculos o cuadrantes (cuadro 1). Otras aplicaciones forestales de los experimentos sistemáticos son: el mejoramiento genético de árboles; la competencia inter e intraespecífica con *Pseudotsuga menziesii* y *Alnus rubra* (Newton y Cole, 2006); la densidad y el crecimiento con *Pinus pinaster* (Lemoine, 1980) y en Ecuador con *Cordia alliodora* (Hummel, 2000); el incremento de la mortalidad con *Alnus rubra* (Knowe y Hibbs, 1996); así como la productividad del rosal asociado a cultivos de cobertura (Santiago, 2017). Estos diseños Nelder se han utilizado en Europa, Australia, Norte y Centroamérica.

Stonecypher y McCullough (1981), al trabajar con familias seleccionadas de *Pseudotsuga menziesii* en un círculo Nelder, informaron que los objetivos principales fueron: a) examinar la respuesta genética según la densidad de plantación; b) examinar los efectos de la densidad en las variaciones genéticas y sus correlaciones en el tiempo; y c) examinar los efectos de la densidad en distintas variables de respuesta. Krinard (1985), trabajando con clones de *Populus fremontii* en densidades de 63 a 1,135 árboles por acre, utilizó un diseño Nelder que consistió en cuatro círculos cada uno con 22 radios; dos radios sirvieron como efecto de borde y un clon diferente de la especie que fue asignado al azar en cada uno de los 20 radios. El ángulo entre radios fue 16.63° , cada árbol hacia afuera y desde el centro del círculo tenía 76% más de espacio de crecimiento que el árbol anterior en cada radio. Con seis árboles por radio, se midió la altura y el diámetro; utilizó un diseño de bloques completos al azar para el análisis estadístico ($\alpha \leq 0.05$), donde los círculos eran repeticiones y las distancias eran tratamientos.

En otro estudio, Imada *et al.* (1997) argumentaron que la utilización del círculo Nelder fue muy útil al experimentar con plántulas de *Quercus mongolica* porque les permitió manejar distintas densidades (de 1,086 a 40,816 pl·ha⁻¹) en un área pequeña. Por esta razón muchos investigadores forestales han utilizado los diseños sistemáticos Nelder para evaluar el impacto del espacio de crecimiento en coníferas y en particular en árboles de hoja ancha; puesto que las parcelas compactas son más económicas y a menudo más adecuadas para aplicar tratamientos y formas de manejo.

En otros avances con los diseños Nelder, Hummel (2000) encontró que la relación entre el diámetro y la densidad en árboles de *Cordia alliodora* fue lineal y negativa; y que la altura no se asoció significativamente con las densidades de plantación del diseño. Por lo que la relación del incremento en altura en las densidades observadas pudo ser el resultado de las densidades extremadamente altas en el diseño Nelder, o de un tamaño de muestra pequeño.

Cuadro 1
Experimentos forestales y agroforestales con diseño Nelder.

Forma	Especies	Densidad (pl·ha ⁻¹)	Referencia
Modificado	<i>Pennisetum americanum</i>	De 50,000 a 400,000	Carberry <i>et al.</i> (1985)
Círculo (12,000 m ²)	<i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Setaria sphacelata</i>	De 42 a 3,580	Eastham y Rose (1988)
Círculo	<i>Populus trichocarpa x deltooides</i> 'Beaupré'	De 139 a 1,451	Steenackers <i>et al.</i> (1993)
Círculo	<i>Picea glauca</i> , <i>Thuja occidentalis</i>	De 692 a 16,129	Krieger (1998)
Círculo (61 m ²)	<i>Dactylis glomerata</i> , <i>Trifolium repens</i>	De 62,500 a 100,000	Sanderson y Elwinger (2002)
Medio círculo (75 m ²)	<i>Fraxinus excelsior</i>	De 423 a 16,857	Kerr (2003)
Cuarto de círculo	<i>Vigna unguiculata</i>	De 4,356 a 32,761	Asiwe <i>et al.</i> (2005)
Modificado (4,282 m ²)	<i>Eucalyptus globulus</i>	De 582 a 2,083	Ferrere <i>et al.</i> (2005)
Cuarto de círculo	<i>Populus x euramericana</i> 'Tasman'	De 84 a 770	McIvor <i>et al.</i> (2005)
Círculo	<i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Populus deltooides</i> , <i>Gleditsia triacanthos</i> , <i>Ulmus pumila</i> , <i>Acer saccharinum</i>	De 1,479 a 111,110	Geyer (2006)
Medio círculo	<i>Marqhamia lutea</i>	De 526 a 18,175	Seebauer (2008)
Cuarto de círculo	<i>Eucalyptus dunnii</i>	De 228 a 4,760	Stape y Binkley (2010)
Círculo	<i>Khaya senegalensis</i>	De 625 a 1,000	Lindsay <i>et al.</i> (2011)
Radial	<i>Eucalyptus grandis</i> , <i>Eucalyptus camaldulensis</i> , <i>Grevillea robusta</i> , <i>Marqhamia lutea</i> , <i>Maesopsis eminii</i> , <i>Khaya nyasica</i>	De 4,167 a 16,667	Kirongo <i>et al.</i> (2012)
Círculo	<i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Quercus rubra</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>	De 1,020 a 30,780	Kuehne <i>et al.</i> (2013)
Círculo	<i>Araucaria cunninghamii</i> , <i>Flindersia brayleyana</i>	De 42 a 3,580	Vanclay <i>et al.</i> (2013)
Círculo	<i>Quercus robur</i>	De 25 a 200,000	Uhl <i>et al.</i> (2015)
Círculo	<i>Brassica oleracea</i>	De 20,000 a 1'000,000	Salter <i>et al.</i> (2015)

No hay otros datos publicados al respecto del manejo de densidades con *Cordia alliodora* para evaluar la competencia intraespecífica; no obstante, en 1984, *Cordia alliodora* fue incluida entre las 12 especies más importantes para leña en parcelas Nelder establecidas en Costa Rica. Desafortunadamente los datos de estas parcelas nunca fueron analizados y desde entonces se han perdido. Años más adelante, Schlönvoigt y Beer (2001) utilizaron el diseño Nelder para investigar la competencia interespecífica entre los árboles de *Cordia alliodora* y *Eucalyptus deglupta* asociados a cultivos de *Zea mays* y *Manihot esculenta*.

Otros autores, como Aparecida de Moraes *et al.* (2013), sugirieron que el diseño en círculo Nelder resulta útil para estimar la variación genética (*ex situ*) en *Jacaranda cuspidifolia*, utilizando como carácter de selección la altura de planta; se encontró el mayor rendimiento en esta especie a un espaciamiento de 8.96 m²-planta. Redmond *et al.* (2005) adoptaron el análisis de regresión no lineal para evaluar variables en *Pseudotsuga menziesii*: área basal, diámetro a la altura del pecho, altura total, volumen de copa y espaciamiento; usando argumentos de la aleatorización y la uniformidad del sitio, asumiendo que las observaciones provenían de muestras aleatorias, para facilitar el análisis de regresión.

Con el fin de obtener mejores valores en términos de rendimiento y calidad en los experimentos forestales con diseños Nelder, se debe optimizar el establecimiento y el manejo de plantaciones; especialmente en el caso de malezas de hoja ancha, puesto que un mayor espaciamiento es un factor favorable para el desarrollo de las especies no deseadas. Es importante acotar que el establecimiento de ensayos con una nueva plantación, no debe agotar los recursos indebidamente. Si bien el diseño Nelder es estadísticamente menos riguroso que experimentos aleatorios, es una herramienta muy eficaz para entender el impacto del espacio de crecimiento en plantaciones donde las correlaciones son muy fuertes; debido a que las mediciones son hechas fácilmente y los resultados pueden ser tabulados y graficados. Sin embargo, diversos enfoques metodológicos pueden ser utilizados por los investigadores del sector forestal.

Estudios agroforestales

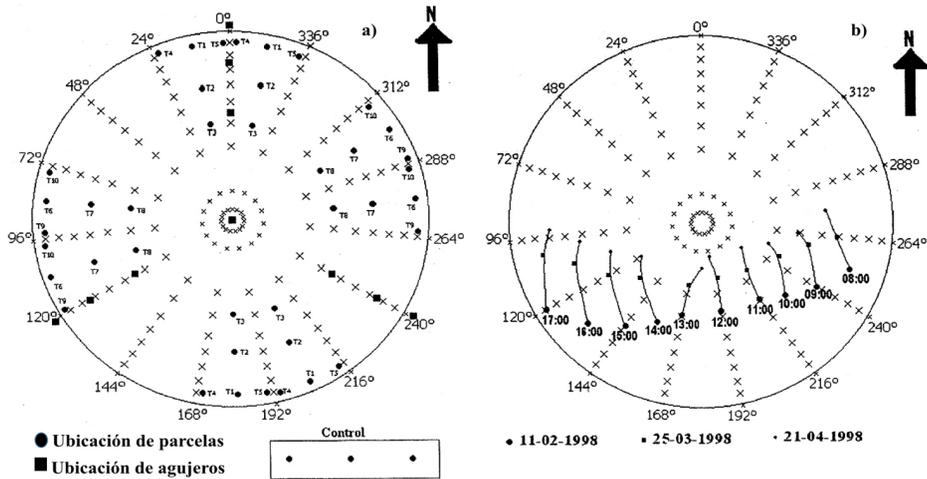
Las asociaciones de varias especies y que al menos una de ellas sea perenne leñosa en un sistema de uso de la tierra, da lugar a las alternativas agroforestales (pudiendo incluso incorporar animales diversos; cuadro 1). En un sistema silvopastoril en círculo Nelder realizado por Cameron *et al.* (1994), encontraron que el espaciamiento de árboles influyó marcadamente en el crecimiento del pasto *Setaria sphacelata* cv Kazangula. Mientras que el pastoreo por el ganado resultó ser dañino para los árboles jóvenes, se podría permitir una vez que los árboles hayan alcanzado una altura de cinco a seis metros; mostrando además evidencia de un efecto dominó por causa de que el crecimiento de los árboles finalmente fue inhibido en los círculos intermedios debido a la competencia por agua (Eastham y Rose, 1988; Cameron *et al.*, 1994).

Kohli y Saini (2003), al asociar *Eucalyptus tereticornis* y *Triticum aestivum* en un sistema agroforestal, concluyeron que al utilizar un diseño de plantación en círculo

Nelder, la orientación de las hileras de árboles y la distancia influían significativamente en el rendimiento del cultivo asociado, debido al efecto del ángulo de sol (que cambia con la temporada de crecimiento) (figura 6).

Figura 6

Representación esquemática de un diseño de plantación en círculo Nelder.



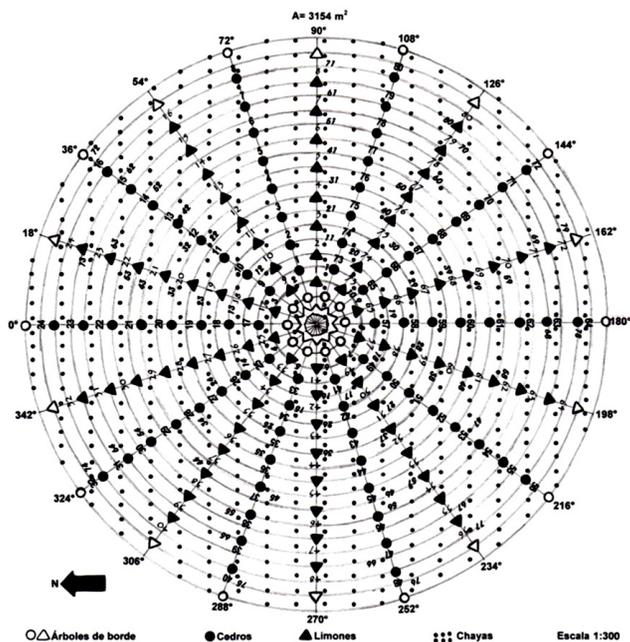
En a) ubicación de los tratamientos; en (b) la posición del sol vista desde el centro a diferentes horas del día y en diferentes fechas; las x representan la posición de cada árbol de *Eucalyptus tereticornis*. Fuente: Kohli y Saini (2003).

En otro ejemplo agroforestal, Aguilar-Luna *et al.* (2011) establecieron una plantación circular con cedro rojo (*Cedrela odorata*) y lima persa (*Citrus latifolia*), la cual consistió de 20 círculos concéntricos y 20 radios (a 18° de apertura entre ellos) (figura 7). Alternando un círculo con cedros y uno con limas a 1.50 m de distancia entre ellos. Superpuesto al círculo Nelder se estableció el cultivo de chaya (*Cnidoscolus chayamansa*), en un diseño de plantación en marco rectangular.

La chaya no fue incluida en el círculo Nelder junto con cedros y limones por cuatro razones: 1) para no confundir el efecto de competencia de los árboles con el cultivo, puesto que generalmente, la densidad de un cultivo siempre es mayor que la densidad de los árboles; 2) porque el manejo agronómico de la chaya fue distinto; 3) porque con la combinación de ambos diseños se favoreció aún más la competencia interespecífica; y 4) porque la sumatoria de las densidades en ambos diseños definió los tratamientos posibles. Finalmente, Santiago (2017) evaluó la productividad del rosal, asociado a cultivos de cobertura en un diseño circular, concluyendo que las asociaciones con fabáceas incrementan la productividad del rosal y mejoran la fertilidad del suelo.

Figura 7

Diseño circular superpuesto a un diseño en marco rectangular para el sistema agroforestal cedro-lima-chaya.



Fuente: Aguilar-Luna *et al.* (2011).

Conclusiones

Los diseños Nelder son una forma de representar en campo el diseño de una plantación forestal, agrícola o agroforestal de forma sistemática según el criterio del investigador. Éstos muestran un patrón específico que permite economizar el espacio y costo del experimento. Los tratamientos no son aleatorios, por lo tanto, los datos no pueden ser analizados mediante un análisis de varianza tradicional, pero sí mediante un análisis de regresión o correlación. Tienen su mayor aplicación en estudios de mejoramiento genético, manejo de densidades de plantación, así como de competencia inter e intraespecífica. Una desventaja es la mortalidad, la cual puede afectar los datos de ese árbol perdido y de los cuatro adyacentes; ante ello, se debe reducir tal efecto procurando la replicación del diseño y en etapas tempranas del experimento, hacer replantación.

Literatura citada

Affleck, D.L.R. (1998). *A Comparative Study of Spatial Analysis Methods for Forestry Nelder Experiments*. Tesis de maestría. Department of Forest Resource Management, University of British Columbia, Vancouver, Canadá.

- Aguilar-Luna, J.M.E.; Macario-Mendoza, P.A.; Hernández-Daumás, S.; Huerta-Lwanga, E. y de Alba-Becerra, R. (2011). Crecimiento y productividad en la asociación agroforestal 'cedro-lima-chaya' a diferente densidad de plantación. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 6 (4): 694-702.
- Aparecida de Moraes, M.; Bozzite de Moraes, S.M.; Bueno da Silva, E.C.; Kuboyama-Kubota, T.Y.; Marques-Silva, A.; Vilela de Resende, M.D. y Teixeira de Moraes, M.L. (2013). Variação genética em progênies de Jacaranda cuspidifolia Mart. utilizando o delineamento sistemático tipo "leque". *Scientia Forestalis (Piracicaba)*, 41 (98): 175-183.
- Asiwe, J.A.N.; Nokoe, S.; Jackai, L.E.N. y Ewete, F.K. (2005). Does Varying Cowpea Spacing Provide Better Protection Against Cowpea Pests? *Crop Protection*, 24 (5): 465-471.
- Cameron, D.; Rance, S.; Edwards, D.C. y Jones, D. (1994). Árboles y pastura: Un estudio sobre los efectos del espaciamiento. *Agroforestería en las Américas*, 1: 18-20.
- Carberry, P.S.; Campbell, L.C. y Bidinger, F.R. (1985). The Growth and Development of Pearl Millet as Affected by Plant Population. *Field Crops Research*, 11 (1): 193-205.
- Chalita, M.A.C. (1991). *Delineamentos sistemáticos*. Tesis de maestría. Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidad de Sao Paulo, Piracicaba, Brasil.
- Eastham, J. y Rose, C.W. (1988). Pasture Evapotranspiration under Varying Planting Density in an Agroforestry Experiment. *Agricultural Water Management*, 15: 87-105.
- Egí, D.B. (1988). Plant Density and Soybean Yield. *Crop Science*, 28: 977-981.
- Ferrere, P.; López, G.A.; Boca, R.T.; Galetti, M.A.; Esparrach, C.A. y Pathauer, P.S. (2005). Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus globulus* en un ensayo Nelder modificado. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 14 (2): 174-184.
- Franco, M. y Harper, J. (1988). Competition and the Formation of Spatial Pattern in Spacing Gradients: an Example Using *Kochia Scoparia*. *Journal of Ecology*, 76: 959-974.
- Galinski, W.; Witowski, J. y Zwieniecki, M. (1994). Non-Random Height Pattern Formation in Even Aged Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Nelder Plots as Affected by Spacing and Site Quality. *Forestry*, 67 (1): 49-61.
- Geyer, W.A. (2006). Biomass Production in the Central Great Plains USA under Various Coppice Regimes. *Biomass and Bioenergy*, 30: 778-783.
- Hummel, S. (2000). Height, Diameter and Crown Dimensions of *Cordia Alliodora* Associated with Tree Density. *Forest Ecology and Management*, 127: 31-40.
- Imada, M.; Kunisaki, T.; Mizoue, N. y Teraoka, Y. (1997). Optimum Planting Density for Japanese Oak (*Quercus Mongolica* var. *Grosseserrata*) Based on Spacing Experiment with Systematic Design. *Journal Forestry Research*, 2: 89-93.
- Kenward, M.G. (1987). A Method for Comparing Profiles of Repeated Measurements. *Applied Statistics*, 36: 296-308.
- Kerr, G. (2003). Effects of Spacing on the Early Growth of Planted *Fraxinus excelsior* L. *Canadian Journal Forestry Research*, 33: 1196-1207.
- Kirongo, B.B.; Mbelase, A.S.; Senelwa, K.; Hitimana, J. y Etiegni, L. (2012). Spacing and Genotype on Height and Diameter Growth of four *Eucalyptus* under Short Rotation. *Journal Manajemen Hutan Tropika*, 18 (1): 1-9.
- Knowe, S.A. y Hibbs, D.E. (1996). Stand Structure and Dynamics of Young Red Alder as Affected by Planting Density. *Forest Ecology and Management*, 82: 69-85.
- Kohli, A. y Saini, B.C. (2003). Microclimate Modification and Response of Wheat Planted under Trees in a Fan Design in Northern India. *Agroforestry Systems*, 58: 109-118.
- Krieger, C. (1998). *The Effects of Tree Spacing on Diameter, Height and Branch Size in White Spruce*. *Forestry, Working Now for the Future*. Charlottetown, Canadá. 12 p.
- Krinard, R.M. (1985). *Cottonwood Development through 19 Years in a Nelder's Design*. Research note SO-322. USDA, Forest Service, USA. 4 p.
- Kuehne, C.; Kublin, E.; Pyttel, P. y Bauhus, J. (2013). Growth and Form of *Quercus robur* and *Fraxinus excelsior* Respond Distinctly Different to Initial Growing Space: Results from 24-Year-Old Nelder Experiments. *Journal of Forestry Research*, 24 (1): 1-14.

- Lemoine, B. (1980). Stand Density, Competition and Cooperation in Maritime Pine II. Results at 5 and 10 Years of a Plantation with Variable Spacing. *Annals des Sciences Forestieres*, 37 (3): 217-237.
- Lindsay, D.A.; Kelly, N.; Dickinson, G. y Congdon, R.A. (2011). *Silviculture of Small-Scale Mahogany Wood Lots in North Queensland - Some Observations*. Abstracts from Darwin 2011 African Mahogany Plantation Industry Forum, pp. 37-38.
- Mark, W.B. (1983). *Spacing Trials Using the Nelder Wheel*. Gen. Tech. Rep. PSW-69. Berkeley, California: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service. USA; pp. 81-85.
- McIvor, I.R.; Metral, B. y Douglas, G.B. (2005). Variation in Root Density of Poplar Trees at Different Plant Densities. *Agronomy New Zealand*, 35: 66-73.
- Mora, G.A. (1996). Método de ajuste de un modelo rendimiento-densidad para observaciones provenientes del diseño sistemático de Nelder. *Revista de la Facultad de Agronomía (Maracay)*, 22: 31-36.
- Mora, G.A. (1999). Análisis estadístico de un diseño sistemático de Nelder basado en un modelo de antedependencia. *Revista de la Facultad de Agronomía (Maracay)*, 25: 75-82.
- Nelder, J.A. (1962). New Kinds of Systematic Designs for Spacing Experiments. *Biometrics*, 18 (3): 283-307.
- Newton, M. y Cole, E. (2006). Use of Growth Curve Derivatives to Illustrate Acceleration and Deceleration of Growth in Young Plantations under Variable Competition. *Canadian Journal Forestry Research*, 36: 2515-2522.
- Oda-Souza, M.; Décio, B.; Justiniano-Ribeiro, J. y Stape, J.L. (2008). Aplicação de métodos geoestatísticos para identificação de dependência espacial na análise de dados de um ensaio de espaçamento florestal em delineamento sistemático tipo leque. *Revista Árbore*, 32 (3): 499-509.
- Parrott, D.L.; Brinks, J.S. y Lhotka, J.M. (2012). Designing Nelder Wheel Plots for Tree Density Experiments. *New Forests*, 43 (2): 245-254.
- Patel, N.M. y Patel, R.M. (1985). Hotelling T² Approach in Analyzing the Results from Systematic Design. *Gujarat Agricultural University Research Journal*, 10 (2): 37-39.
- Pretzsch, H. (2011). Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 73 (1): 63-65.
- Redmond, J.; Gallagher, G. y Siúrtáin, M.M. (2005). Systematic Spacing Trials for Plantation Research and Demonstration. *Silviculture / Management*, 12: 1-6.
- Renshaw, E. y Ford, E.D. (1984). The Description of Spatial Pattern Using Two-Dimensional Spectral Analysis. *Vegetatio*, 56: 75-85.
- Ritchie, G.A. (1997). Evidence for Red: Far Red Signaling and Photomorphogenic Growth Response in Douglas-Fir (*Pseudotsuga menziesii*) Seedlings. *Tree Physiology*, 17: 161-168.
- Salter, P.J.; Andrews, D.J. y Akehurst, J.M. (2015). The Effects of Plant Density, Spatial Arrangement and Sowing Date on Yield and Head Characteristics of a New Form of Broccoli. *Journal of Horticultural Science*, 59 (1): 79-85.
- Sanderson, M.A. y Elwinger, G.F. (2002). Plant Density and Environment Effects on Orchardgrass-White Clover Mixtures. *Crop Science*, 42: 2055-2063.
- Santiago, R.K. (2017). *Cultivos de cobertura en la productividad de Rosa spp., (tipo grandiflora) a cielo abierto*. Tesis de licenciatura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- Schlönvoigt, A. y Beer, J. (2001). Initial Growth of Pioneer Timber Tree Species in a Taungya System in the Humid Lowlands of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 51: 97-108.
- Seebauer, M. (2008). *Silvicultural Study on Markhamia Lutea With Regard to Short Rotation Energy Plantations*. EU Re-impact project. Unique Forestry Consultants Ltd, Freiburg, Alemania. Pp. 34.
- Spellman, H. y Nagel, J. (1992). *Auswertung des Nelder-Pflanzenversuche mit Kiefer im Forstamt Walsrode*. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Ztg. Alemania. 163. Jg. 11/12.
- Stape, J.L. y Binkley, D. (2010). Insights from Full-Rotation Nelder Spacing Trials with *Eucalyptus* in Sao Paulo, Brazil. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 72 (2): 91-98.
- Steenackers, J.; Steenackers, V.; Acker, J.V. y Stevens, M. (1993). Stem Form, Volume and Dry Matter Production in a Twelve-Year-Old Circular Nelder Plantation of *Populus Trichocarpa* x *Deltoides* 'Beaupré'. *The Forestry Chronicle*, 69 (6): 730-735.

- Stonecypher, R. y McCullough, R. (1981). *Evaluation of Full-Sib Families of Douglas fir in a Nelder Design* (pp. 56-76). 16th Southern Forest Tree Improvement Conference. Blacksburg, Virginia. USA.
- Tetio-Kagho, F. y Gardner, F.P. (1988). Responses of Maize to Plant Population Density. II. Reproductive Development, Yield, and Yield Adjustments. *Agronomy Journal*, 80 (6): 935-940.
- Uhl, E.; Biber, P.; Ulbricht, M.; Heym, M.; Horváth, T.; Lakatos, F.; Gál, J.; Steinacker, L.; Tonon, G.; Ventura, M. y Pretzsch, H. (2015). Analysing the Effect of Stand Density and Site Conditions on Structure and Growth of Oak Species Using Nelder Trials along an Environmental Gradient: Experimental Design, Evaluation Methods, and Results. *Forest Ecosystems*, 2: 1-19.
- Van Deusen, P.C. y Bayle, B. (1991). *Evaluating Plot Designs for the Tropics*. Generation Technology Report SO-87. USDA. USA. 15 p.
- Van Slyke, A. (1963). *Analysis of Nelder Systematic Designs*. Forestry 466, Term Project. Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Vanclay, J.K.; Lamb, D.; Erskine, P.D. y Cameron, D.M. (2013). Spatially Explicit Competition in a Mixed Planting of *Araucaria Cunninghamii* and *Flindersia Brayleyana*. *Annals of Forest Science*, 70 (6): 611-619.
- Zavitkovski, J. (1982). Characterization of Light Climate under Canopies of Intensively Cultured Hybrid Poplar Plantations. *Agricultural Meteorology*, 25: 245-255.
- Zeide, B. (1993). Analysis of Growth Equations. *Forest Science*, 39 (3): 594-616.

Recibido: 22 de junio de 2018

Enviado a arbitraje: 5 de julio de 2018

Dictamen: 7 de febrero de 2019

Aceptado: 2 de marzo de 2019