

Spatial analysis of phenotypic variables in a clonal orchard of *Pinus arizonica* Engelm. in northern Mexico

Análisis espacial de las variables fenotípicas en un huerto clonal de *Pinus arizonica* Engelm. en el norte de México

Rolando Alvarado-Barrera¹; Marín Pompa-García^{1*}; José M. Zúñiga-Vásquez¹; Marcos Jiménez-Casas²

¹Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales. Av. Papaloapan y bulevar Durango s/n. C. P. 34120. Durango, Dgo., México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado en Ciencias Forestales. km 36.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: mpgarcia@ujed.mx, tel.: +52 (618) 1301096.

Abstract

Introduction: Seed orchards provide germplasm genetically suitable for use in forest restoration. Knowledge of the spatial distribution of attributes is crucial for their management.

Objective: To model cone production and tree size variables in a clonal orchard of *Pinus arizonica* Engelm. from a geospatial perspective in order to determine their behavior and distribution.

Materials and methods: The spatial pattern of tree size variables and cone production of 126 ramets were determined through a geospatial analysis, using the Getis-Ord G statistic. A Pearson correlation analysis ($P \leq 0.05$) determined the variables best associated with cone production and these were examined with stepwise regression. In terms of cone production, the best combination was modeled through a geographically weighted regression.

Results and discussion: Statistically significant ($P < 0.01$) clustering values were found in the orchard. Correlation analysis showed that all tree size variables, including the moisture index, were statistically related to cone production. Stepwise regression identified a model that presented crown diameter as the variable that best explained cone production. Geographically weighted regression showed that crown diameter moderately influenced cone production.

Conclusion: Tree size variables and cone production presented a tendency towards clustering. The use of a geospatial perspective allowed a better understanding of the spatial dynamics of tree size variables.

Keywords: cone production; tree size variables; spatial distribution; G statistic; geographically weighted regression.

Resumen

Introducción: Los huertos semilleros proporcionan germoplasma genéticamente adecuado para su uso en restauraciones forestales. Conocer la distribución espacial de los atributos es crucial para su gestión.

Objetivo: Modelar la producción de conos y las variables dasométricas en un huerto clonal de *Pinus arizonica* Engelm., desde una perspectiva geoespacial, para conocer su comportamiento y distribución.

Materiales y métodos: El patrón espacial de las variables dasométricas y de la producción de conos de 126 rametos se determinó con un análisis geoespacial, utilizando el estadístico G de Getis-Ord. Mediante un análisis de correlación de Pearson ($P \leq 0.05$) se determinaron las variables mejor asociadas con la producción de conos y se examinaron con una regresión *stepwise*. La mejor combinación, en términos de la producción de conos, se modeló a través de una regresión geográficamente ponderada.

Resultados y discusión: Se encontraron valores de agrupación estadísticamente significativos ($P < 0.01$) en el huerto. El análisis de correlación mostró que todas las variables dasométricas, incluido el índice de humedad, están relacionadas estadísticamente con la producción de conos. La regresión *stepwise* identificó un modelo que incluía el diámetro de copa como la mejor variable para explicar la producción de conos. La regresión geográficamente ponderada mostró que el diámetro de la copa influyó moderadamente en la producción de conos.

Conclusión: Las variables dasométricas y la producción de conos mostraron tendencia a la agrupación. El uso de una perspectiva geoespacial permitió comprender mejor la dinámica espacial de las variables dasométricas.

Palabras clave: producción de conos; variables dasométricas; distribución espacial; estadístico G; regresión geográficamente ponderada.

Introduction

Forest ecosystems provide goods and services to humanity (Rendón, Martínez, & Pérez, 2014); however, forests are exposed to anthropogenic disturbances and processes that cause the genetic degradation of many forest species (Guevara-Hernández et al., 2011). It is therefore necessary to develop strategies that allow the conservation of groups of forest species genes, which is of particular importance to the maintenance of an inventory of quality plants for use in forest restoration programs (Bustamante-García et al., 2012).

Seed orchards are a useful and economic means by which to produce genetically improved germplasm in a relatively short time (Gutiérrez-Vázquez, Cornejo-Oviedo, Zermeño-González, Valencia-Manzo, & Mendoza-Villarreal, 2010). In recent decades, seeds produced in such orchards have been used both for commercial forest plantation and reforestation (Muñoz-Gutiérrez et al., 2017). In countries such as Chile, New Zealand and Canada, seed orchards are often used for germplasm production in order to meet the strategic needs of forest plantations (Mead, 2013). According to the Mexican National Forestry Commission (CONAFOR, 2014), Mexico only has 11 seed orchards, located in the states of Veracruz, Chiapas, Durango, Oaxaca and Puebla.

Despite their importance to seed production and the genetic improvement of species, research on seed orchards has been limited. In 2005, two orchards were established in the state of Chihuahua, Mexico. The first in an ejido (a Mexican system of communal land tenure) called El Largo, in which the seed production has not been reported. The second was a clonal orchard of *Pinus arizonica* Engelm., located in the south of that state, characterized by a promising production of cones (Pérez, Pompa-García, Solís, & Chacón, 2014). Tree size data could help to improve the productive potential of these orchards; however, there is a lack of such data in both cases.

Since geographic data are temporally and spatially variable, it is necessary to use tools other than classical statistics that assume the occurrence of ecological phenomena under identical circumstances and the independence of observations. As a result, increasingly sophisticated geospatial analyses (Carroll et al., 2015) play an important role in the understanding of geographical relationships. For example, spatial analysis allows researchers to determine whether ecological variables are random or clustered (Getis & Ord, 1992) and helps to determine the reasons for such spatial distributions (Fotheringham, Crespo, & Yao, 2015). The use of statistical tools such as geographically weighted regression (GWR) is a useful option for the

Introducción

Los ecosistemas forestales proporcionan bienes y servicios a la humanidad (Rendón, Martínez, & Pérez, 2014); sin embargo, los bosques están expuestos a trastornos y procesos antropogénicos que causan la degradación genética de muchas especies forestales (Guevara-Hernández et al., 2011). Por tanto, es necesario desarrollar estrategias que permitan la conservación de grupos de genes de especies forestales, la cual es especialmente importante para mantener un inventario de plantas de calidad para su uso en programas de restauración de bosques (Bustamante-García et al., 2012).

Los huertos semilleros son un medio útil y económico para producir germoplasma genéticamente mejorado en poco tiempo (Gutiérrez-Vázquez, Cornejo-Oviedo, Zermeño-González, Valencia-Manzo, & Mendoza-Villarreal, 2010). En las últimas décadas, las semillas producidas en estos huertos se han utilizado tanto para plantaciones forestales comerciales como para las reforestaciones (Muñoz-Gutiérrez et al., 2017). En países como Chile, Nueva Zelanda y Canadá, los huertos semilleros se utilizan con frecuencia para la producción de germoplasma para cubrir las necesidades estratégicas de plantaciones forestales (Mead, 2013). México cuenta con pocos huertos semilleros; de acuerdo con la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2014), solo tiene 11 de ellos ubicados en los estados de Veracruz, Chiapas, Durango, Oaxaca y Puebla.

A pesar de su importancia en la producción de semillas y el mejoramiento genético de las especies, la investigación sobre los huertos semilleros ha sido limitada. En 2005, se establecieron dos huertos en el estado de Chihuahua, México. El primero en un ejido (tierra comúnmente cultivada) llamado El Largo, cuya producción de semilla no ha sido reportada. El segundo fue un huerto clonal de *Pinus arizonica* Engelm. ubicado en el sur del estado, caracterizado por una producción prometedora de conos (Pérez, Pompa-García, Solís, & Chacón, 2014); no obstante, se carece de información dasométrica. El conocimiento de dichos datos puede ayudar a mejorar el potencial productivo del huerto.

Dado que los datos geográficos varían en tiempo y espacio, es necesario utilizar herramientas distintas de las estadísticas clásicas que suponen que los fenómenos ecológicos ocurren en circunstancias idénticas y que las observaciones son independientes. Como resultado, los análisis geoespaciales que han seguido sofisticándose (Carroll et al., 2015), desempeñan un papel importante en la comprensión de las relaciones geográficas. Por ejemplo, el análisis espacial permite a los investigadores determinar si las variables

spatial examination of non-stationary phenomena (Fotheringham, Brunson, & Charlton, 2004) and facilitates the measurement and visualization of patterns of variation in relationships between dependent and independent variables (Brunson, Fotheringham, & Charlton, 1998). In this sense, geospatial analyses could provide a better understanding of the tree size condition of seed orchards, thus improving their monitoring and management.

The objective of this study was therefore to model, from a geospatial perspective, the cone production and tree size variables of the aforementioned *Pinus arizonica* Engelm. clonal orchard in northern Mexico. It is hypothesized that the distribution of cone production and tree size variables will follow a non-random spatial pattern, and that cone production will be influenced by both tree size and physical variables.

Materials and methods

Study area

The *P. arizonica* clonal orchard was established in 2005 by the company *Silvicultores Unidos de Guachochi, S.C.* (SUG) in the Papajichi ejido, north of the city of Guachochi (27° 8' 57" 'N and 107° 6' 41" ' W; 2400 m asl), Chihuahua, Mexico (Figure 1). The orchard has an almost flat topography with a slope not exceeding 5 %. The climate is semi-humid, semi-cool with rain in summer, and semi-dry, semi-warm in summer. Average annual rainfall is 540.4 mm and the average annual temperature is 10.8 °C. The lowest average temperatures occur in January and December (-6 to -4 °C) and the highest in July and August (16.5 to 17.5 °C). The dominant soils are Regosols and Leptosols with loam textures on broken slopes, described in the 2014 world reference base (Pérez et al., 2014). The land surrounding the orchard is predominantly used for forestry and livestock purposes (González-Cásares, Pompa-García, & Camarero, 2017).

The clonal orchard covers an area of 1 ha. To prevent the entry of cattle, a perimeter fence of 2 m in height was placed around the orchard. A large capacity water tank was installed in an area adjacent to the orchard in order to water the trees during the dry season, although the tank is currently not functional. The orchard has 126 surviving ramets, each with an alphanumeric identification code following an ascending order.

Grafts of *P. arizonica* were made in 2005 using the terminal fissure technique (Muñoz-Flores, Prieto-Ruiz, Flores-García, Pineda-Ojeda, & Morales-González, 2013) in the *Silvicultores Unidos de Guachochi* forest nursery. The grafts came from the apex of the branches located in the upper part of the trees. The orchard design is

ecológicas son aleatorias o tienden a agruparse (Getis & Ord, 1992), y ayuda a comprender las razones de esas distribuciones espaciales (Fotheringham, Crespo, & Yao, 2015). El uso de herramientas estadísticas como la regresión geográficamente ponderada (GWR) es una opción potencial que examina espacialmente fenómenos no estacionarios (Fotheringham, Brunson, & Charlton, 2004) y facilita la medición y visualización de patrones de variación en las relaciones entre variables dependientes e independientes (Brunson, Fotheringham, & Charlton, 1998). En este sentido, los análisis geospaciales podrían proporcionar una mayor comprensión de la condición dasométrica de los huertos semilleros para un mejor monitoreo y manejo.

En consecuencia, el objetivo de este estudio fue modelar, desde una perspectiva geoespacial, la producción de conos y las variables dasométricas del huerto clonal de *Pinus arizonica* Engelm. en el norte de México. Se hipotetiza que la distribución de la producción de conos y las variables dasométricas siguen un patrón espacial no aleatorio, y que la producción de conos está influenciada por variables tanto dasométricas como físicas.

Materiales y métodos

Área de estudio

El huerto clonal de *P. arizonica* fue establecido en 2005 por la corporación *Silvicultores Unidos de Guachochi, S.C.* (SUG) en el ejido Papajichi, al norte de la ciudad de Guachochi (27° 8' 57" 'N y 107° 6' 41" ' W; altitud de 2400 m), Chihuahua, México (Figura 1). El huerto tiene una topografía casi plana con una pendiente de 5 % o menos. El clima es semihúmedo, semifrío con lluvia en verano, y semiseco, semicálido en verano. La precipitación promedio anual es de 540.4 mm y la temperatura promedio anual es 10.8 °C. Las temperaturas medias más bajas se producen en enero y diciembre (-6 a -4 °C) y las temperaturas medias más altas, en julio y agosto (16.5 a 17.5 °C). Los suelos dominantes son Regosoles y Leptosoles con texturas medianas en pendientes rotas, descritas en la base de referencia mundial de 2014 (Pérez et al., 2014). El uso del suelo que rodea al huerto es predominantemente forestal y ganadero (González-Cásares, Pompa-García, & Camarero, 2017).

El huerto clonal tiene superficie de 1 ha. Para evitar la entrada de ganado, se colocó una cerca perimetral de 2 metros de altura alrededor del huerto. Un tanque de agua de gran capacidad fue instalado en un área adyacente al huerto para regar los árboles durante la estación seca, aunque actualmente no es funcional. El huerto tiene 126 rametos supervivientes y cada uno tiene un código de identificación alfanumérico que sigue un orden ascendente.

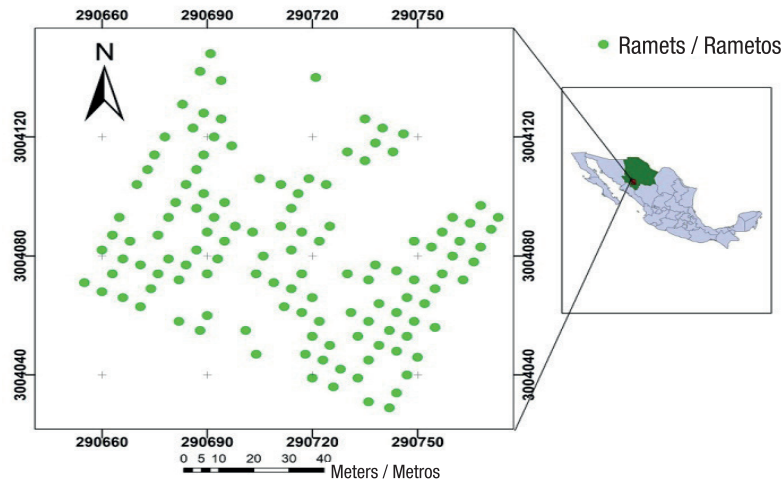


Figure 1. Location of the study area: *Pinus arizonica* clonal orchard with 126 ramets in the Papajichi ejido, municipality of Guachochi, Chihuahua, Mexico.

Figura 1. Localización del área de estudio: huerto clonal de *Pinus arizonica* con 126 rametos en el ejido Papajichi, municipio de Guachochi, Chihuahua, México.

regular with a square frame layout, in which each tree occupies the vertex of the square angle, so that the distance between the trees and between the rows is constant; the spacing is six meters between ramets. There are 16 clone lines in the orchard with 17 random positions per line.

Data

Data were obtained in October 2017. All trees were labeled with aluminum foil to facilitate subsequent identification. For each tree, the following measurements were taken: diameter at the base, diameter at breast height (1.30 m from ground level), crown height, total height, and larger, smaller and medium crown diameters, including the azimuth. Photographs were also taken of each tree and the 2016 cone production data were consulted. Each of these variables was entered into a geographic database. In addition, soil depth data were recorded at four sites in the orchard.

Spatial analysis

A geospatial analysis was conducted using the G statistic described by Getis and Ord (1992). This allowed determination of the spatial pattern of the tree size variables and cone production. To find G, we used ArcGis 10.2 software (Environmental Systems Research Institute [ESRI] 2011), where G is defined as:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}(d) X_i X_j}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N X_i X_j}; i \neq j$$

Los injertos de *P. arizonica* se realizaron en 2005 mediante la técnica de fisura terminal (Muñoz-Flores, Prieto-Ruiz, Flores-García, Pineda-Ojeda, & Morales-González, 2013) en el vivero forestal de Silvicultores Unidos de Guachochi. Los injertos procedieron del vértice de las ramas ubicadas en la parte superior de los árboles. El diseño del huerto es regular con una disposición de marco real o cuadrado, donde cada árbol ocupa el vértice del ángulo cuadrado, de modo que la distancia entre los árboles y entre las filas es siempre la misma; el espaciado es de 6 m entre rametos. Hay 16 líneas de clones en el huerto con 17 posiciones por línea al azar.

Datos

Los datos se obtuvieron en octubre de 2017. Todos los árboles se etiquetaron con papel de aluminio para facilitar la identificación posterior. En cada árbol se midió el diámetro en la base, diámetro a la altura del pecho a 1.30 m, altura de copa, altura total, y diámetros mayor, menor y medio de copa, incluido el azimut. Asimismo, se tomaron fotografías de cada árbol y se accedió a los datos de producción de cono del 2016. Cada una de estas variables se ingresaron en una base de datos geográficos. Además, se tomaron datos de profundidad de suelo en cuatro zonas del huerto.

Análisis espacial

Se hizo un análisis geoespacial utilizando el estadístico G descrito por Getis y Ord (1992). Esto permitió determinar el patrón espacial de las variables dasométricas y de la producción de conos. Para encontrar G, se usó el

where:

G = Getis-Ord statistic

x_{ij} = measurement of attributes for units i and j , respectively

$W_{ij}(d)$ = one or zero in a symmetric spatial matrix used to detect the proximity between i and j

d = distance.

To determine whether the G statistic differed significantly from a random distribution, a test of statistical significance for Z in the G cluster was performed:

$$Z = \frac{G(d) - G_E(d)}{\text{StdDev}[G(d)]}$$

where:

Z = value of the clustering statistic

G = random value of the G statistic test

G_E = expected value of the G statistic test

StdDev = standard deviation of $G(d)$.

The Z test assumes that there is no global autocorrelation, but when autocorrelation exists it has a significant impact on the expected value of G . This impact verifies the validity and accuracy of the clustering. The analysis makes it possible to determine whether or not the spatial randomness hypothesis can be accepted. A high Z score associated with a low P value indicates a statistically significant non-random spatial distribution (G_i _Bin). Three levels of reliability were examined: 90, 95 and 99 %.

Association between cone production and tree size variables

A Pearson correlation analysis ($P \leq 0.05$) was performed in order to determine the association between cone production and tree size variables. This correlation also considered the values of the Normalized Difference Water Index (NDWI), commonly used to monitor drought (Gao, 1996). This is a satellite-derived index that uses near infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) channels. The SWIR reflectance reflects changes in the water content of the vegetation and the spongy mesophilic structure in vegetation canopies, while NIR reflectance is affected by the internal structure of the leaf and its dry matter content, but not by water content. The NDWI was calculated from a Landsat 8 image (Route: 33, Row: 41) using the following formula:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

where NIR corresponds to Landsat 8 band 5, and SWIR to Landsat 8 band 6. To eliminate atmospheric effects on the reflectance of the terrestrial surface, an atmospheric correction of the bands that make

software ArcGIS 10.2 (Environmental Systems Research Institute [ESRI] 2011), donde G se define como:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}(d) X_i X_j}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N X_i X_j}; i \neq j$$

donde:

G = Estadístico de Getis-Ord

x_{ij} = medición de atributos para las unidades i y j , respectivamente

$W_{ij}(d)$ = uno o cero en una matriz espacial simétrica utilizada para detectar la proximidad entre i y j

d = distancia.

Para determinar si el estadístico G era significativamente diferente de una distribución aleatoria, se resolvió una prueba de significancia estadística para Z en la agrupación G :

$$Z = \frac{G(d) - G_E(d)}{\text{DesvStd}[G(d)]}$$

donde:

Z = valor del estadístico de la agrupación

G = valor aleatorio de la prueba estadística G

G_E = valor esperado de la prueba estadística G

DesvStd = desviación estándar de $G(d)$.

La prueba Z supone que no hay autocorrelación global, pero cuando existe autocorrelación tiene un impacto significativo en el valor esperado de G . Este impacto significativo verifica la validez y la precisión de la agrupación. El análisis permite determinar si la hipótesis de aleatoriedad espacial puede ser rechazada o no. Una puntuación Z alta asociada con un valor bajo de P indica una distribución espacial no aleatoria estadísticamente significativa (G_i _Bin). Se examinaron tres niveles de confiabilidad: 90 %, 95 % y 99 %.

Asociación entre la producción de conos y las variables dasométricas

Se hizo un análisis de correlación de Pearson ($P \leq 0.05$) con el fin de determinar la asociación entre la producción de conos y las variables dasométricas. Esta correlación también consideró los valores del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés), comúnmente utilizado para monitorear la sequía (Gao, 1996). Este es un índice derivado del satélite que utiliza los canales de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). La reflectancia SWIR refleja los cambios en el contenido de agua de la vegetación y la estructura mesófila esponjosa en las marquesinas de vegetación, mientras que la reflectancia NIR se ve afectada por la estructura interna de la hoja y por su contenido de materia seca, pero no por el contenido de agua. El NDWI se calculó a partir de una imagen

up the image was necessary, for which the Apparent Reflectance at the Top of the Atmosphere (TOA) method was applied. This method enables conversion of the digital levels of the original image into reflectance percentages and uses a single model of the variation of TOA reflectance with sun and satellite position to adjust to a standard angular configuration. The model implicitly assumes a constant atmosphere, and combines the correction of atmospheric effects and Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) effects into a single angular configuration function (Flood, 2014). To improve the resolution of the NDWI pixels, resampling was conducted in ArcGis, producing an NDWI image with a resolution of 5 x 5 m.

The variables that best correlated with cone production and those of greatest statistical importance were examined using an exploratory stepwise regression analysis. This tool evaluates possible combinations of explanatory variables to determine which models fulfill all of the diagnoses of a regression model, and thus allows selection of the model that best complies with all goodness-of-fit parameters. Once the best combination was identified in terms of cone production, it was modeled through a local geographically weighted regression (GWR) analysis (Brunsdon, Fotheringham, & Charlton, 1996). This method evaluates the heterogeneity of the data and estimates the parameters of each location (sampled points) in order to fit each model to each sampled data point, providing more detailed results and a fuller understanding of the process (Duarte-Cunha, Almeida, Cunha, & Souza-Santos, 2016; Pimentel, Lopes, Mexia, & Mumford, 2016).

The GWR model is described as follows:

$$Y_i(u) = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i} + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi}$$

where,

Y_i = dependent variable

β_{0i} and β_{1i} = parameters describing the relationship among the coordinates (u) of the i -th point in space (specific site)

x_{mi} = m -th variable at the i -th point.

In this case, the dependent variable was cone production, while the independent variable was crown diameter. The GWR model was processed using ArcGis 10.2.2 software. This analysis allows mapping of the statistics of the results and can therefore identify the specific geographic space in which the independent variable has the greatest influence on the dependent variable.

Results

Table 1 indicates that there was variation in the tree size variables of the 126 ramets examined. There are

Landsat 8 (Ruta: 33, Fila: 41) utilizando la siguiente fórmula:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

donde NIR corresponde a Landsat 8 banda 5, y SWIR, a Landsat 8 banda 6. Para eliminar los efectos que la atmósfera causa en la reflectancia de la superficie terrestre fue necesaria una corrección atmosférica de las bandas que componen la imagen, para ello se aplicó el método *Apparent Reflectance at the Top of Atmosphere* (TOA). Por medio de este método es posible convertir los niveles digitales de la imagen original en porcentajes de reflectancia. Este enfoque utiliza un único modelo de la variación de la reflectancia TOA con la posición del sol y del satélite, para ajustarse a una configuración angular estándar. Dicho modelo supone implícitamente una atmósfera constante y aplica la corrección de los efectos atmosféricos y los efectos *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) en una función única de configuración angular (Flood, 2014). Para mejorar la resolución de los píxeles del NDWI, se hizo un remuestreo en ArcGis, cuyo resultado fue una imagen de NDWI con resolución de 5 x 5 m.

Las variables que se correlacionaron mejor con la producción de conos y de mayor importancia estadística se examinaron mediante un análisis exploratorio de la regresión tipo *stepwise*. Esta herramienta evalúa las posibles combinaciones de variables explicativas para determinar qué modelos pasan todos los diagnósticos de un modelo de regresión y permite seleccionar el mejor modelo que cumpla con todos los parámetros de bondad de ajuste. Una vez que se identificó la mejor combinación en términos de la producción de conos, se modeló a través de un análisis local de regresión geográficamente ponderada (GWR) (Brunsdon, Fotheringham, & Charlton, 1996). Este método evalúa la heterogeneidad de los datos y estima los parámetros de cada ubicación (puntos muestreados), para ajustar cada modelo a cada punto de datos muestreados, brindando resultados más detallados y una mejor comprensión del proceso (Duarte-Cunha, Almeida, Cunha, & Souza-Santos, 2016; Pimentel, Lopes, Mexia, & Mumford, 2016).

El modelo GWR se describe de la siguiente manera:

$$Y_i(u) = \beta_{0i}(u) + \beta_{1i}(u)x_{1i} + \beta_{2i}(u)x_{2i} + \dots + \beta_{mi}(u)x_{mi}$$

donde,

Y_i = variable dependiente

β_{0i} y β_{1i} = parámetros que describen la relación alrededor de las coordenadas (u) del i -ésimo punto en el espacio (sitio específico)

x_{mi} = m -ésima variable en el i -ésimo punto.

Table 1. Descriptive statistics of 126 ramets from the *Pinus arizonica* clonal orchard in the Papajichi ejido, municipality of Guachochi, Chihuahua, Mexico.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de 126 rametos del huerto clonal de *Pinus arizonica* en el ejido Papajichi, municipio de Guachochi, Chihuahua, México.

Descriptive measurement/ Medida descriptiva	DB (cm)	DBH (cm)/ DAP (cm)	CH (m)/ AC (m)	TH (m)/ AT (m)	LCD (m)/ DMC (m)	SCD (m)/ DmC (m)
Mean/Media	19	11	3.87	4.35	3.42	3.09
Mode/Moda	24	11	3.50	5.00	3.60	2.60
SD/DE	6	5	1.44	1.47	1.34	1.24
Maximum/Máximo	36	24	7.40	8.00	6.50	6.10
Minimum/Mínimo	6	2	0.50	1.10	0.70	0.60

DB: diameter at base, DBH: diameter at breast height, CH: crown height, TH: total height, LCD: largest crown diameter, SCD: smallest crown diameter, SD: standard deviation of the mean.

DB: diámetro a la base, DAP: diámetro altura de pecho, AC: altura de copa, AT: altura total, DMC: diámetro mayor de copa, DmC: diámetro menor de copa, DE: desviación estándar de la media.

125 live ramets in the orchard, representing a survival rate of 45.95 % since 2005; a low vigor ramet with signs of mortality was included in the analysis. Cones were produced in 35 % of the ramets (44 individuals), ranging from 1 to 587 cones per tree.

Spatial trends of tree size variables

The tree size variables followed a non-random distribution, indicating that the attributes are clustered. According to Figure 2, approximately 25 % of the trees, located in the southeastern section of the orchard, showed statistically significant ($P < 0.01$) clustering.

Figure 3 shows that cone production also presented a statistically significant ($P \leq 0.01$) non-random spatial distribution with clustering. Individual trees with clustered cone production (20.66 %) were distributed in the southeastern section of the orchard, coinciding only partially with the section in which the tree size variables were clustered.

Association between cone production and tree size variables

Pearson's correlation analysis indicated that all tree size variables and the NDWI presented statistically significant ($P \leq 0.05$) correlations with cone production (Figure 4). The NDWI revealed differences in moisture levels in some areas of the orchard, specifically in the northern and southern areas, with values from 0.13 to -0.13. The NDWI has no dimensions and its values range from -1 to 1, depending not only on the water content of the leaf, but also on the vegetation type and cover.

En este caso, la variable dependiente fue producción de conos y la variable independiente fue el diámetro de copa. El modelo GWR se procesó utilizando el *software* ArcGIS 10.2.2; este análisis permite el mapeo de las estadísticas de los resultados y, por lo tanto, puede identificar el espacio geográfico específico donde la variable independiente tiene mayor influencia sobre la variable dependiente.

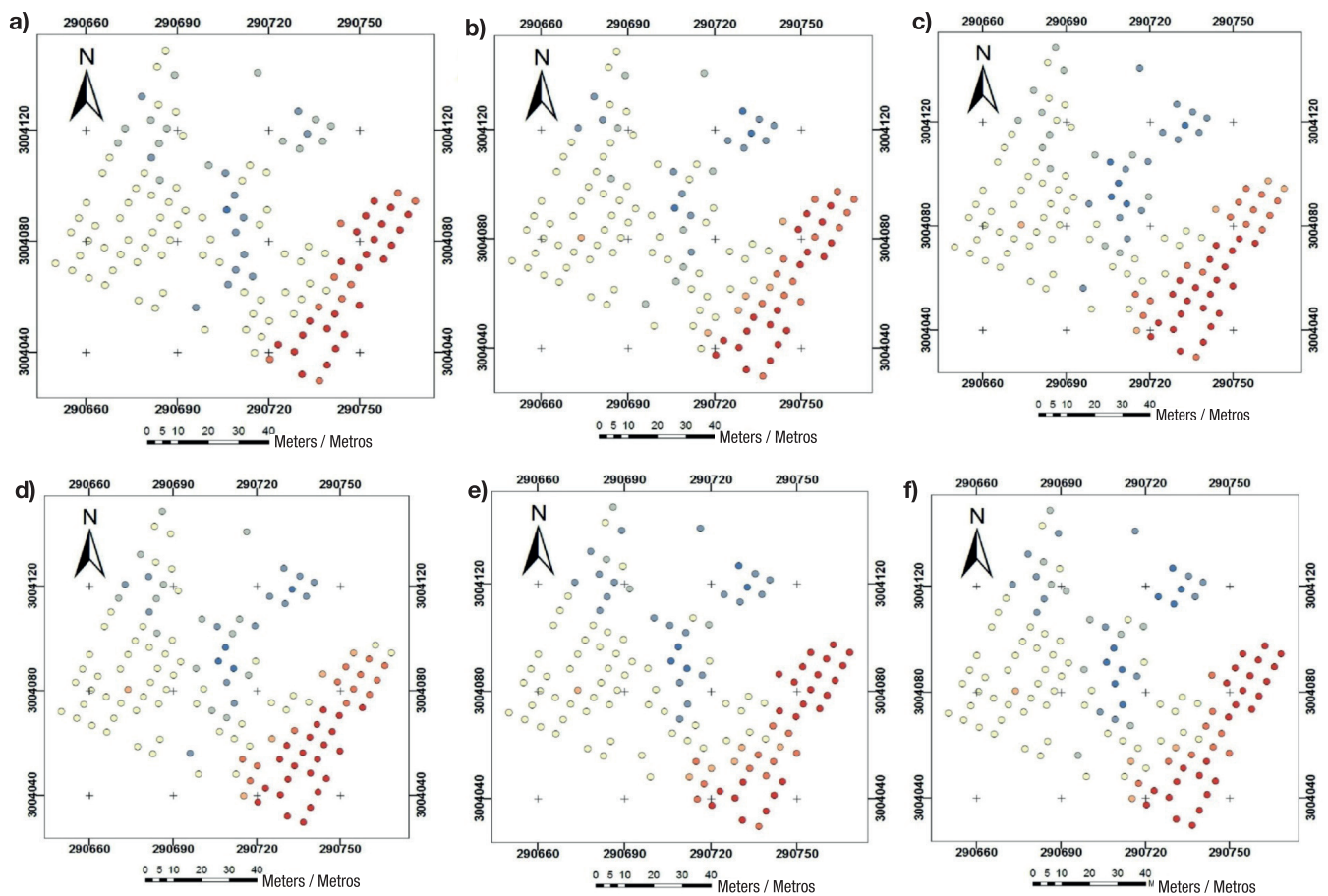
Resultados

El Cuadro 1 indica que hubo variación en las variables dasométricas de los 126 rametos examinados. En el huerto hay 125 rametos vivos, lo que representa una tasa de supervivencia de 45.95 % desde 2005; un rameto con bajo vigor y signos de mortandad fue incluido en el análisis. Los conos se produjeron en 35 % de los rametos (44 individuos), variando de 1 a 587 conos por árbol.

Tendencias espaciales de las variables dasométricas

Las variables dasométricas de los árboles siguieron una distribución no aleatoria, lo cual indica que los atributos se agrupan. De acuerdo con la Figura 2, aproximadamente 25 % de los árboles, ubicados en la sección sureste del huerto, mostraron agrupación estadísticamente significativa ($P < 0.01$).

En la Figura 3 se observa que la producción de conos también mostró una distribución espacial no aleatoria estadísticamente significativa ($P \leq 0.01$) con agrupación. Los árboles individuales con producción de conos agrupados (20.66 %) se distribuyeron en la sección sureste del huerto, coincidiendo solo parcialmente



Legend / Leyenda Gi_Bin

- Coldspot / Punto frío -99 % Confidence / Confianza
- Coldspot / Punto frío -95 % Confidence / Confianza
- Coldspot / Punto frío -90 % Confidence / Confianza
- Not significant / No significante
- Hotspot / Punto caliente -90 % Confidence / Confianza
- Hotspot / Punto caliente -95 % Confidence / Confianza
- Hotspot / Punto caliente -99 % Confidence / Confianza

Figure 2. Hotspots of the tree size variables of *Pinus arizonica*: diameter at the base (a), diameter at breast height (b), crown height (c), total height (d), larger crown diameter (e) and smaller crown diameter (f).

Figura 2. Puntos calientes de las variables dasométricas de *Pinus arizonica*: diámetro a la base (a), diámetro a la altura de pecho (b), altura de copa (c), altura total (d), diámetro mayor de copa (e) y diámetro menor de copa (f).

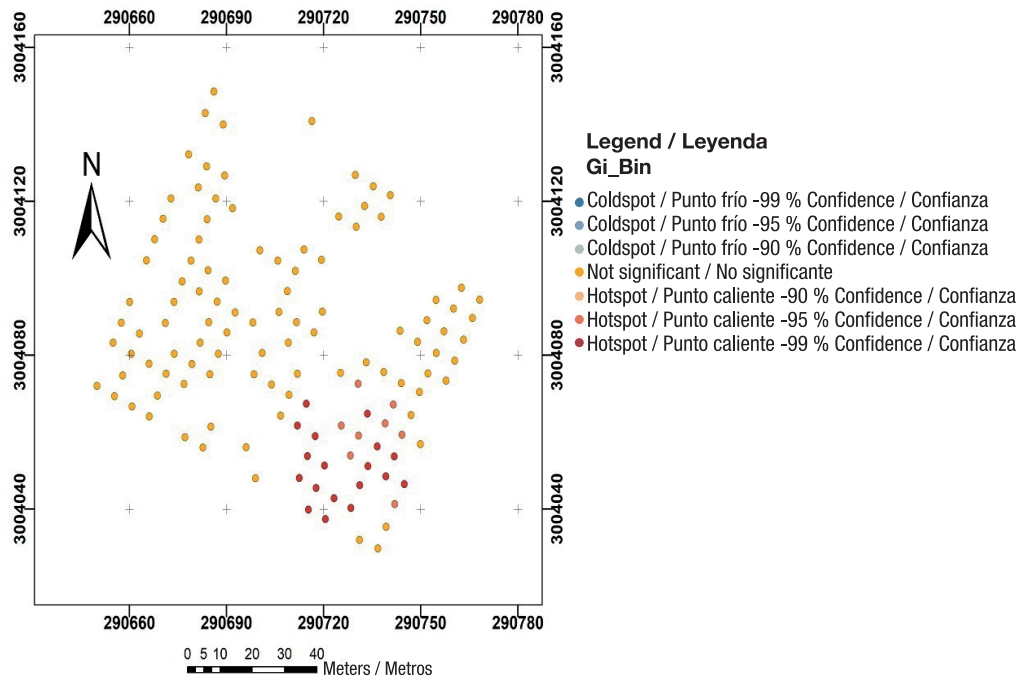


Figure 3. Hotspots of cone production of 126 *Pinus arizonica* ramets in the Papajichi ejido, municipality of Guachochi, Chihuahua, Mexico.

Figura 3. Puntos calientes de la producción de conos de 126 rametos de *Pinus arizonica* en el ejido Papajichi, municipio de Guachochi, Chihuahua, México.

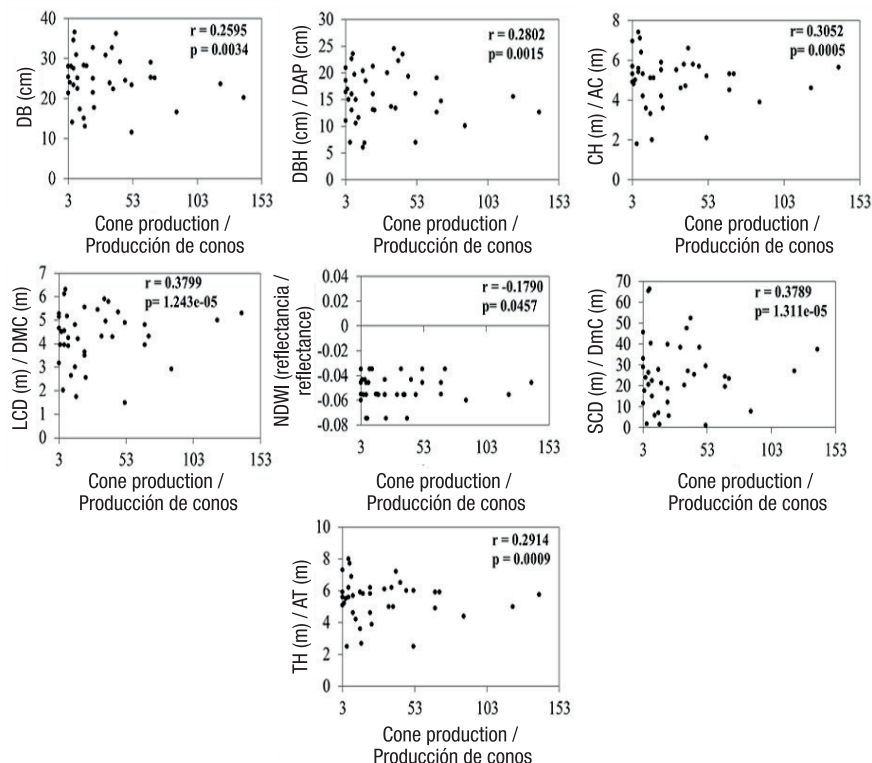


Figure 4. Matrix of the scatter plot between cone production and *Pinus arizonica* tree size variables (DB: diameter at the base, DBH: diameter at breast height, CH: crown height, LCD: larger crown diameter, NDWI: Normalized difference water index, SCD: smaller crown diameter and TH: total height).

Figura 4. Matriz de la gráfica de dispersión entre la producción de conos y las variables dasométricas de *Pinus arizonica* (DB: diámetro a la base, DAP: diámetro altura de pecho, AC: altura de copa, DMC: diámetro mayor de copa, NDWI: Índice de agua de diferencia normalizada, DmC: diámetro menor de copa y AT: altura total).

In Figure 5, high NDWI values correspond to high vegetation water content, and low values indicate low vegetation water content. In periods of water stress, the NDWI decreases.

The exploratory regression analysis identified the model that best complied with the goodness of the regression fit as that which integrated the crown diameter variable only. This variable was modeled through GWR and revealed a moderate influence on cone production. The model statistics were mapped in Figure 6.

con la misma sección donde las variables dasométricas se agruparon.

Asociación entre la producción de conos y las variables dasométricas

El análisis de correlación de Pearson indicó que todas las variables dasométricas y el NDWI mostraron correlación estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) con la producción de conos (Figura 4). El NDWI reveló diferencias en la humedad en algunas zonas del huerto, específicamente en las zonas norte y sur con valores de

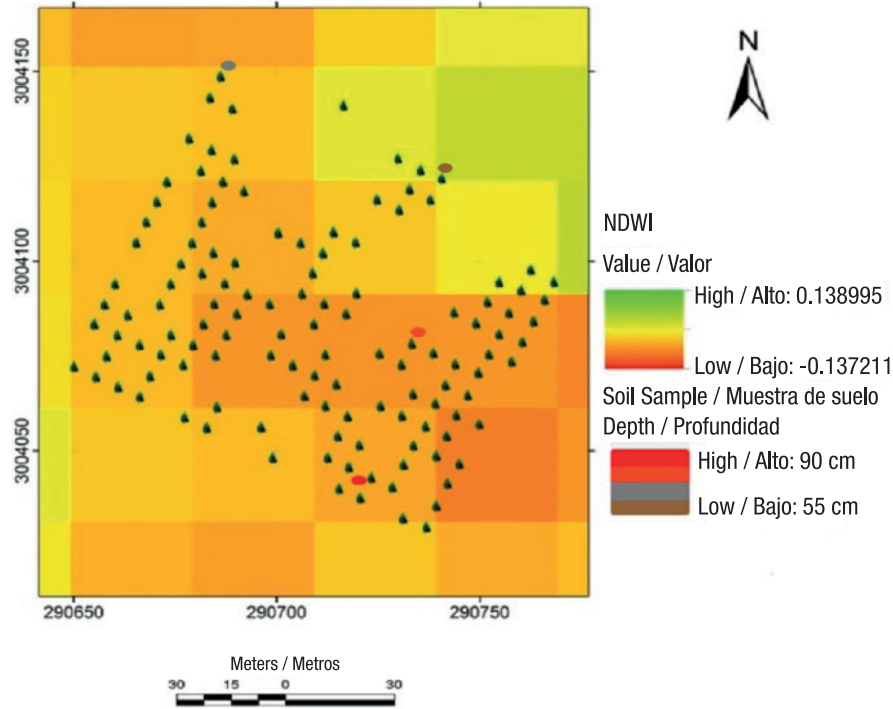


Figure 5. Normalized difference water index (NDWI) of the *Pinus arizonica* clonal orchard and depth of soil samples from the Papajichi ejido, municipality of Guachochi, Chihuahua, Mexico.
Figura 5. Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) del huerto clonal de *Pinus arizonica* y profundidad de las muestras de suelo del ejido Papajichi, municipio de Guachochi, Chihuahua, México.

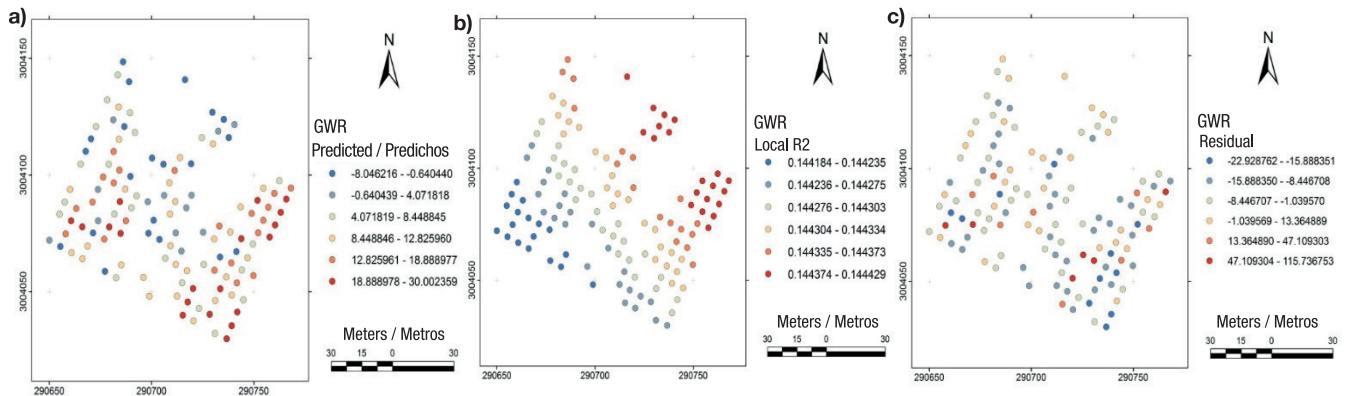


Figure 6. Local geographically weighted regression (GWR) model statistics for the crown diameter variable: predicted values (a), local R² values (b) and residual values (c).
Figura 6. Estadísticas del modelo local de regresión geográficamente ponderada (GWR) para la variable diámetro de la copa: valores pronosticados (a), locales de R² (b) y valores residuales (c).

Discussion

This study reports the spatial pattern of tree size variables, cone production and causal variables of a *P. arizonica* clonal orchard in Guachochi, Chihuahua. Some studies have modeled tree size variables using spatial analysis (Bozali, Sivrikaya, & Akay, 2015; Corral-Rivas, Wehenkel, Castellanos-Bocaz, Vargas-Larreta, & Diéguez-Aranda, 2010; Elobaid, Shitan, Ibrahim, Ghani, & Daud, 2009; Rubio-Camacho et al., 2017; Silva-Flores, Pérez-Verdín, & Wehenkel, 2014), but this has only been conducted in managed forests to date. Our study is one of the first to use a geospatial approach to better understand a clonal orchard.

Spatial modeling of tree size has been conducted mainly through global autocorrelation models (Aguirre, Hui, von Gadov, & Jiménez, 2003; Elobaid et al., 2009); however, the G statistic can also be used for local spatial analysis, since it allows identification of specific areas where the ecological variables are non-randomly distributed (Rodrigues & de la Riva, 2014). The G statistic has been used in several fields of research, including forest fire studies (Pompa-García & Hernández-González, 2012; Zúñiga-Vásquez, Cisneros-González, Pompa-García, Rodríguez-Trejo, & Pérez-Verdín, 2017), econometrics (Moreno-Serrano & Vayá-Valcarce, 2002), quality of life assessments (Pérez & Valbuena, 2017) and tourism analysis (Lado-Sestayo & Vivel-Búa, 2016).

This work demonstrated the value of the G statistic in terms of understanding the spatial distribution of tree size variables. The use of the G statistic revealed that tree size variables and cone production were both distributed non-randomly with a tendency towards clustering, so special emphasis should be placed on the high clustering or hotspot rates (categories 1, 2 and 3, with reliability percentages of 90, 95 and 99 %, respectively). The spatial pattern of these variables is influenced by one or more physico-environmental and even anthropogenic variables and identification of the clustering pattern is therefore strategic for decision making and consequent analysis, in order to determine the causative variables of the spatial trend. The clustering illustrates the variation in tree size characteristics of individual trees within the orchard.

The local geographically weighted regression model allowed identification of the causes of clustering, specifically in terms of cone production. It should be noted that, under this model, only tree size variables and a moisture index (NDWI) were analyzed, although, according to Viveros-Viveros, Camarillo-Luna, Sáenz-Romero, and Aparicio-Rentería (2013), the clustering of tree size variables is attributable to genetic or environmental factors. In the present study, the use of soil depth data was an indicator of the causes

0.13 a -0.13. El NDWI no tiene dimensiones y varía de -1 a 1, dependiendo del contenido de agua de la hoja, pero también del tipo y cobertura de la vegetación. En la Figura 5, los valores altos de NDWI corresponden a un contenido alto de agua de vegetación, y los valores bajos indican el bajo contenido de agua de vegetación. En periodos de estrés hídrico, el NDWI disminuirá.

El análisis de regresión exploratorio identificó el modelo que cumplía mejor con la bondad del ajuste de regresión como el que solo integraba la variable diámetro de la copa. Esta variable se modeló a través de GWR y reveló una influencia moderada en la producción de conos. Las estadísticas del modelo fueron mapeadas en la Figura 6.

Discusión

En este estudio se reporta el patrón espacial de las variables dasométricas, la producción de conos y las variables causales de un huerto clonal de *P. arizonica* en Guachochi, Chihuahua. Algunos estudios han modelado variables dasométricas utilizando análisis espaciales (Bozali, Sivrikaya, & Akay, 2015; Corral-Rivas, Wehenkel, Castellanos-Bocaz, Vargas-Larreta, & Diéguez-Aranda, 2010; Elobaid, Shitan, Ibrahim, Ghani, & Daud, 2009; Rubio-Camacho et al., 2017; Silva-Flores, Pérez-Verdín, & Wehenkel, 2014), pero hasta ahora solo se han hecho en bosques manejados. Nuestro estudio es uno de los primeros en utilizar un enfoque geoespacial para comprender mejor un huerto clonal.

El modelado espacial de variables dasométricas se ha realizado principalmente mediante modelos globales de autocorrelación (Aguirre, Hui, von Gadov, & Jiménez, 2003; Elobaid et al., 2009); no obstante, el estadístico G también se puede usar para el análisis espacial local, ya que permite la identificación de áreas específicas donde las variables ecológicas se distribuyen de forma no aleatoria (Rodrigues & de la Riva, 2014). El estadístico G se ha utilizado en varios campos de investigación, incluidos los estudios de incendios forestales (Pompa-García & Hernández-González, 2012; Zúñiga-Vásquez, Cisneros-González, Pompa-García, Rodríguez-Trejo, & Pérez-Verdín, 2017), econometría (Moreno-Serrano & Vayá-Valcarce, 2002), evaluaciones de calidad de vida (Pérez & Valbuena, 2017) y análisis de turismo (Lado-Sestayo & Vivel-Búa, 2016).

En este trabajo se demostró la capacidad del estadístico G para ayudar a comprender la distribución espacial de las variables dasométricas. El uso del estadístico G permitió concluir que tanto las variables dasométricas como la producción de conos se distribuyeron de forma no aleatoria con una tendencia a la agrupación, por lo cual se debe poner énfasis especial a las tasas altas de agrupamiento o *hotspots* (categorías 1, 2 y 3 con porcentajes de confiabilidad de 90, 95 y

of clustering in the orchard. Coincidentally, the clustering occurred in soils with a depth ≥ 0.90 m, while there was a lack of clustering in areas where the soil had a depth ≤ 0.55 m. Similarly, Rodríguez-Laguna, Razo-Zárate, Juárez-Muñoz, Capulín-Grande, and Soto-Gutiérrez (2012) argue that soil type in a particular area influences the clustering of trees with the best phenotypic characteristics and the highest cone and seed production.

Since the grafting of clones in 2005, certain orchard areas have shown high mortality or the absence of individual trees. While determination of the causes of this phenomenon was beyond the scope of this study, this mortality could be attributed to the accumulation of water and the presence of rodents. This finding makes the effective management of the orchard imperative.

While the NDWI values did not contribute significantly to the regression model, the relationship between this variable and cone production was negative (Figure 4). High moisture values were found mainly where there was no clustering of tree size variables (including tree mortality) and spatially coincided with sites of shallower soil depth and thus lower drainage capacity. On the other hand, low moisture values were found in the area of tree size variable cluster grouping and cone production, where the soil was deeper and therefore had better drainage; i.e., excess moisture seems to affect cone production and tree development. This could be explained by water stress in the trees through the effect of excess moisture. Nakai and Kisanuki (2007) state that some tree mortality and growth inhibition are strongly influenced by excess water, specifically by the anaerobic conditions this produces in the soil. This lack of oxygen is related to low root elongation rates, dry mass reduction, and decreased photosynthetic capacity.

In the model of the present study, crown diameter moderately explained cone production. The production also presented clustering, but not in exactly the same area where the tree size variables were clustered. This suggests that cone production does not necessarily coincide with trees that have the best phenotypic characteristics. On the other hand, the results of González-Ávalos et al. (2006) indicate that the increase in the average number of cones per tree is probably caused by increased crown size. This occurs because, as crown size increases, there is a greater number of branches and growth units (bud lengthening sites) in the tree. These authors indicate that, since crown diameter has a greater influence on cone production, the variable is strategic and requires management through pruning and grafting in order to improve cone production in the orchard. In another study, Ávila-Flores and Pompa-García (2008) argue that clones with

99 %, respectivamente). El patrón espacial de dichas variables está influenciado por una o más variables físicoambientales e incluso antropogénicas; por lo tanto, la identificación del patrón de agrupamiento es estratégica para la toma de decisiones y análisis consecuentes, con el fin de determinar las variables causativas de la tendencia espacial. La agrupación ilustra la variación en las características dasométricas de árboles individuales dentro del huerto.

El modelo local de regresión geográficamente ponderada permitió la identificación de las causas de agrupación, específicamente en la producción de cono. Cabe señalar que, bajo este modelo, solo se analizaron las variables dasométricas y un índice de humedad (NDWI), aunque, según Viveros-Viveros, Camarillo-Luna, Sáenz-Romero, y Aparicio-Rentería (2013), la agrupación de las variables dasométricas se atribuyen a factores genéticos o ambientales. En el presente estudio, el uso de datos de profundidad de suelo fue un indicador de las causas de agrupamiento en el huerto. Coincidentemente, el agrupamiento se presentó en suelos con profundidad ≥ 0.90 m y se careció de agrupamiento en zonas donde el suelo tuvo profundidad ≤ 0.55 m. De manera similar, Rodríguez-Laguna, Razo-Zárate, Juárez-Muñoz, Capulín-Grande, y Soto-Gutiérrez (2012) argumentan que el tipo de suelo, en una zona particular, influye en la agrupación de árboles con las mejores características fenotípicas y la mayor producción de conos y semillas.

Desde el injerto de clones en 2005, ciertas áreas del huerto mostraron mortalidad alta o la ausencia de árboles individuales. Si bien las causas de dicho fenómeno están fuera del alcance de este estudio, la mortalidad podría atribuirse a la acumulación de agua y la presencia de roedores. Estas evidencias hacen imperativo el manejo.

Aunque los valores del NDWI no contribuyeron de forma significativa al modelo de regresión, la relación entre esta variable y la producción de conos fue negativa (Figura 4). Los valores altos de humedad se encontraron principalmente donde no hubo agrupación de variables dasométricas (incluida la mortalidad de los árboles) y coincidieron espacialmente con lugares que tienen menor profundidad del suelo y, por consiguiente, menor capacidad de drenaje. Por otra parte, los valores bajos de humedad se encontraron en la zona del agrupamiento de las variables dasométricas y la producción de conos, donde el suelo era más profundo y, por lo tanto, presentaba mejor drenaje; es decir, el exceso de humedad parece afectar la producción de conos y el desarrollo de los árboles. Esto podría explicarse por el estrés hídrico en los árboles a través de un exceso de humedad. Nakai y Kisanuki (2007) afirman que la mortalidad de algunos árboles y la inhibición del

better phenotypic characteristics should be used for breeding programs because the longevity of the graft carrier helps control the development of propagated vegetative material.

These results establish a basis for future explorations of other causal variables that determine the spatial patterns found. This research will contribute to the design of improved management strategies and can serve as a reference with which to study other seed orchards. In addition, the study clearly shows that the monitoring of seed orchards should not only focus on the genetic material, but also on the dynamics of the tree size and environmental variables of the orchard. For example, the characteristics and conditions of the clonal orchard studied can be compared with those of the El Largo ejido, where cone production has not been documented to date.

Conclusions

The tree size variables of *Pinus arizonica*, as well as cone production, showed a tendency to cluster, which leads to rejection of the hypothesis of randomness. It was found that crown diameter influences cone production, although in the future some genotypic and environmental variables should be modeled. The use of a geospatial perspective allowed a fuller understanding of the spatial dynamics of the tree size variables in the *P. arizonica* clonal orchard studied. Geospatial analyses provide an important alternative for generating subsequent knowledge in the management of clonal orchards in Mexico. While these specialized prescriptions are beyond the objectives of this study, management strategies involving experts in the subject are urgently required.

Acknowledgments

The authors are grateful for the support of Alberto Pérez Luna and Lizbeth Guadalupe Bustillos Hermsillo for obtaining field data, as well as the Mexican National Science and Technology Council (CONACYT) and the Science and Technology Council of the State of Durango (COCYTED) for supporting the studies of the first author. Thanks are also due to our colleagues at <https://dendroed.ujed.mx/> for their support and advice in conducting this study, and to the referees and editors whose review improved the manuscript.

crecimiento están fuertemente influenciadas por el exceso de agua, específicamente por la falta de oxígeno. Esta falta de oxígeno está relacionada con las tasas bajas de elongación de la raíz, la reducción de masa seca y la disminución de la capacidad fotosintética.

En el modelo del presente estudio, el diámetro de copa explicó moderadamente la producción de cono. La producción también mostró agrupación, pero no exactamente en la misma área donde las variables dasométricas se agruparon. Esto sugiere que la producción de conos no necesariamente coincide con los árboles que tienen las mejores características fenotípicas. Por otra parte, los resultados de González-Ávalos et al. (2006) indican que el aumento en el número promedio de conos por árbol es causado probablemente por un aumento en el tamaño de la copa. Esto ocurre porque a medida que el tamaño de la copa aumenta, hay un número mayor de ramas y unidades de crecimiento (sitios de alargamiento de yemas) en el árbol. Dichos autores indican que, debido a que el diámetro de copa tiene mayor influencia en la producción de conos, la variable resulta estratégica y exige darle manejo a través de podas e injertos para mejorar la producción de conos en el huerto. En otro estudio, Ávila-Flores y Pompa-García (2008) sostienen que los clones con mejores características fenotípicas deben usarse para los programas de mejoramiento, debido a que la longevidad del portador del injerto ayuda a controlar el desarrollo de material vegetativo propagado.

Los resultados establecen una base para futuras exploraciones de otras variables causales que determinan los patrones espaciales encontrados. Esta investigación permitirá diseñar mejores estrategias de manejo y puede ser una referencia para estudiar otros huertos semilleros. Además, el estudio muestra claramente que el monitoreo de los huertos de semillas no solo debe centrarse en el material genético, sino también en la dinámica de las variables dasométricas y ambientales del huerto; por ejemplo, las características y condiciones del huerto clonal estudiado pueden compararse con aquél del ejido El Largo, donde hasta ahora no se ha documentado la producción de cono.

Conclusiones

Las variables dasométricas de *Pinus arizonica*, así como la producción de conos, mostraron una tendencia a agruparse, lo que permite rechazar la hipótesis de aleatoriedad. Se encontró que el diámetro de copa influye en la producción de conos, aunque en el futuro se deben modelar algunas variables genotípicas y ambientales. El uso de una perspectiva geoespacial permitió comprender la dinámica espacial de las variables dasométricas de un huerto clonal de *P. arizonica*. Los análisis geoespaciales presentan una

End of English version

References / Referencias

- Aguirre, O., Hui, G., von Gadow, K., & Jiménez, J. (2003). An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management*, 183(1-3), 137–145. doi: 10.1016/S0378-1127(03)00102-6
- Ávila-Flores, D., & Pompa-García, M. (2008). Caracterización de la reproducción clonal del género *Pinus* en Silvicultores Unidos de Guachochi, Chihuahua. *Universale Forestum*, 7(2), 12–15. Retrieved from <https://www.ujed.mx/doc/publicaciones/universale-forestum/universale-forestum-7-2.pdf>
- Bozali, N., Sivrikaya, F., & Akay, A. E. (2015). Use of spatial pattern analysis to assess forest cover changes in the Mediterranean region of Turkey. *Journal of Forest Research*, 20(4), 365–374. doi: 10.1007/s10310-015-0493-2
- Bustamante-García, V., Prieto-Ruiz, J. Á., Merlín-Bermudes, E., Álvarez-Zagoya, R., Carrillo-Parra, A., & Hernández-Díaz, J. C. (2012). Potencial y eficiencia de producción de semilla de *Pinus engelmannii* Carr., en tres rodales semilleros del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(3), 7–21. doi: 10.21829/myb.2012.183355
- Brunsdon, C., Fotheringham, S., & Charlton, M. (1998). Geographically weighted regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 47(3), 431–443. doi: 10.1111/1467-9884.00145
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. E. (1996). Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 28(4), 281–298. doi: 10.1111/j.1538-4632.1996.tb00936.x
- Carroll, M. W., Matthews, D. A., Hiscox, J. A., Elmore, M. J., Pollakis, G., Rambaut, A., & Abdellati, S. (2015). Temporal and spatial analysis of the 2014–2015 Ebola virus outbreak in West Africa. *Nature*, 524(7563), 97–101. doi: 10.1038/nature14594
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2014). Huertos semilleros. Retrieved November 11, 2018, from http://www.conafor.gob.mx/innovacion_forestal/?p=1005
- Corral-Rivas, J. J., Wehenkel, C., Castellanos-Bocaz, H. A., Vargas-Larreta, B., & Diéguez-Aranda, U. (2010). A permutation test of spatial randomness: Application to nearest neighbour indices in forest stands. *Journal of Forest Research*, 15(4), 218–225. doi: 10.1007/s10310-010-0181-1
- Duarte-Cunha, M., Almeida, A. S. D., Cunha, G. M. D., & Souza-Santos, R. (2016). Geographic weighted regression: applicability to epidemiological studies of leprosy. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 49(1), 74–82. doi: 10.1590/0037-8682-0307-2015
- Elobaid, R. M., Shitan, M., Ibrahim, N. A., Ghani, A. N., & Daud, I. (2009). Evolution of spatial correlation of mean diameter: A case study of trees in natural dipterocarp forest. *Journal of Mathematics and Statistics*, 5(4), 267–269. doi: 10.3844/jmssp.2009.267.269
- alternativa importante para generar conocimiento subsecuente en el manejo de huertos clonales en México. Aunque dichas prescripciones especializadas escapan de los objetivos del presente trabajo, es impostergable buscar estrategias de manejo con expertos en el tema.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por Alberto Pérez Luna y Lizbeth Guadalupe Bustillos Hermosillo en la obtención de datos de campo. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCYTED) por apoyar los estudios del primer autor. Se agradece el apoyo y consejos a los colegas de <https://dendrored.ujed.mx/> para realizar este estudio, y a los árbitros y editores cuya revisión mejoró el manuscrito.

Fin de la versión en español

- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2011). ArcGIS Desktop: Release 10.2. Redlands, CA, USA: Author.
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. E. (2004). Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationship. *American Journal of Agricultural Economics*, 86(2), 554–556. doi: 10.1111/j.0002-9092.2004.600_2.x
- Fotheringham, A. S., Crespo, R., & Yao, J. (2015). Geographical and temporal weighted regression (GTWR). *Geographical Analysis*, 47(4), 431–452. doi: 10.1111/gean.12071
- Flood, N. (2014). Continuity of reflectance data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the Australian landscape. *Remote Sensing*, 6(9), 7952–7970. doi: 10.3390/rs6097952
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. doi: 10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x
- González-Ávalos, J., García-Moya, E., Vargas-Hernández, J. J., Trinidad-Santos, A., Romero-Manzanares, A., & Cetina-Alcalá, V. M. (2006). Evaluación de la producción y análisis de conos y semillas de *Pinus cembroides* Zucc. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(2), 133–138. Retrieved from https://www.chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?seccion=numero&id_revista_numero=34
- González-Cásares, M., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). Differences in climate–growth relationship indicate diverse drought tolerances among five pine

- species coexisting in Northwestern Mexico. *Trees*, 31(2), 531–544. doi: 10.1007/s00468-016-1488-0
- Guevara-Hernández, F., Pinto, R., Rodríguez, L. A., Gómez, H., Ortiz, R., Ibrahim, M., & Cruz, G. (2011). Percepciones locales de la degradación de potreros en una comunidad ganadera de Chiapas, México. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 45(3), 311–319. doi: 10.3923/rjbsci.2010.499.507
- Gutiérrez-Vázquez, B. N., Cornejo-Oviedo, E. H., Zermeño-González, A., Valencia-Manzo, S., & Mendoza-Villarreal, R. (2010). Conversión de un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *greggii* a huerto semillero mediante eigen-análisis. *Bosque*, 31(1), 45–52. doi: 10.4067/S0717-92002010000100006
- Lado-Sestayo, R., & Vivel-Búa, M. (2016). Emprendimiento en el ámbito turístico: dinámica y geografía en la industria hotelera. *Revista Turydes: Turismo y Desarrollo*, 20, 433–444. Retrieved from <http://www.eumed.net/rev/turydes/20/hotel.html>
- Mead, D. J. (2013). *Sustainable management of Pinus radiata plantations*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3274e.pdf>
- Moreno-Serrano, R., & Vayá-Valcarce, E. (2002). Econometría espacial: nuevas técnicas para el análisis regional. Una aplicación a las regiones europeas. *Investigaciones Regionales*, 1, 83–106. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28900104>
- Muñoz-Flores, H. J., Prieto-Ruiz, J. Á., Flores-García, A., Pineda-Ojeda, T., & Morales-González, E. (2013). *Técnicas de injertado “enchapado lateral” y “fisura terminal” en Pinus pseudostrobus Lindl.* Durango, Dgo.: Instituto Nacional de Investigaciones, Agrícolas y Pecuarias. Retrieved from http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/3977/CIRNOC_010208142000054177ok.pdf?sequence=1
- Muñoz-Gutiérrez, L., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Herrera, C., Jiménez-Casas, M., Aldrete, A., & Díaz-Ruiz, R. (2017). Variación espacial y temporal en la dispersión de polen en un huerto semillero y en rodales naturales cercanos de *Pinus patula*. *Bosque*, 38(1), 169–181. doi: 10.4067/S0717-92002017000100017
- Nakai, A., & Kisanuki, H. (2007). Effect of inundation duration on *Salix gracilistyla* density and size on a gravel bar. *Journal of Forest Research*, 12(5), 365–370. doi: 10.1007/s10310-007-0027-7
- Pérez, A., Pompa-García, M., Solís, R., & Chacón, J. (2014). Dinámica dasométrica del huerto clonal de *Pinus arizonica* en los bosques del sur de Chihuahua. In M. Ramos, & V. Aguilera (Eds.), *Ciencias Agropecuarias Handbook T-II* (pp. 104–112). México: ECOMEX. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4866119>
- Pérez-Valbuena, G. J. (2017). Dimensión espacial de la pobreza en Colombia. In J. A. Bonet-Morón (Ed.), *Geografía económica y análisis espacial en Colombia* (pp. 175–222). Colombia: Banco de la República de Colombia. Retrieved from <https://econpapers.repec.org/bookchap/bdrbdrlib/2008-01.htm>
- Pompa-García, M., & Hernández-González, P. (2012). Determinación de la tendencia espacial de los puntos de calor como estrategia para monitorear los incendios forestales en Durango, México. *Bosque*, 33(1), 63–68. doi: 10.4067/S0717-9200201200010000
- Pimentel, R., Lopes, D. J. H., Mexia, A. M. M., & Mumford, J. D. (2016). Validation of a geographic weighted regression analysis as a tool for area-wide integrated pest management programs for *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) on Terceira Island, Azores. *International Journal of Pest Management*, 63(2), 172–184. doi: 10.1080/09670874.2016.1256512
- Rendón, C. H., Martínez, Y. A., & Pérez, S. D. (2014). Los bosques, sus bienes y servicios: los retos del manejo forestal sustentable. *Ciencias*, 111-112, 29–35. Retrieved from <http://www.revistaciencias.unam.mx/es/161-revistas/revista-ciencias-111-112/1397-los-bosques,-sus-bienes-y-servicios-los-retos-del-manejo-forestal-sustentable.html>
- Rodrigues, M., & de la Riva, J. (2014). *Assessing the effect on fire risk modelling of the uncertainty in the location and cause of forest fire*. Coimbra, PT: Coimbra University Press. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10316.2/34305>
- Rodríguez-Laguna, R., Razo-Zárate, R., Juárez-Muñoz, J., Capulín-Grande, J., & Soto-Gutiérrez, R. (2012). Tamaño de cono y semilla en procedencias de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* establecidas en diferentes suelos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 289–298. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802012000400005&script=sci_arttext
- Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M. A., Himmelsbach, W., Ávila-Flores, D. Y., Alanís-Rodríguez, E., & Jiménez-Pérez, J. (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
- Silva-Flores, R., Pérez-Verdín, G., & Wehenkel, C. (2014). Patterns of tree species diversity in relation to climatic factors on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *PLoS ONE*, 9(8), e105034. doi: 10.1371/journal.pone.0105034
- Viveros-Viveros, H., Camarillo-Luna, A. R., Sáenz-Romero, C., & Aparicio-Rentería, A. (2013). Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Bosque*, 34(2), 173–179. doi: 10.4067/S0717-92002013000200006
- Zúñiga-Vásquez J. M., Cisneros-González D., Pompa-García M., Rodríguez-Trejo D. A., Pérez-Verdín G. (2017). Spatial modelling of forest fires in Mexico: an integration of two date sources. *Bosque*, 38(3), 563–574. doi: 10.4067/S0717-92002017000300014