

Spatial analysis of anthracnose in avocado cultivation in the State of Mexico

Análisis espacial de antracnosis en el cultivo de aguacate en el Estado de México

Atenas Tapia-Rodríguez, José Francisco Ramírez-Dávila, Dulce Karen Figueroa-Figueroa, Martha Lidya Salgado-Siclan, Rodolfo Serrato-Cuevas, Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. Campus El Cerrillo, Carretera Toluca-Ixtlahuaca Km 15.5, Piedras Blancas, 50200 Toluca de Lerdo, México. Autor para correspondencia: jframirezd@uaemex.mx.

Recibido: 02 de Noviembre, 2019.

Aceptado: 02 de Diciembre, 2019.

Tapia-Rodríguez A, Ramírez-Dávila JF, Figueroa-Figueroa DK, Salgado-Siclan ML and Serrato-Cuevas R. 2020. Spatial analysis of anthracnose in avocado cultivation in the State of Mexico. Mexican Journal of Phytopathology 38(1): 132-145.

DOI: 10.18781/R.MEX.FIT.1911-1

Primera publicación DOI: 13 de Diciembre, 2019.

First DOI publication: December 13, 2019.

Resumen. El presente estudio contribuye al conocimiento de la distribución espacial de la antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*) en huertos de aguacate en el Estado de México. El estudio se llevó a cabo en los municipios de Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra y Temascaltepec. Se usaron métodos geoestadísticos para determinar la distribución espacial de la antracnosis. Los muestreos se realizaron quincenalmente durante los meses de julio a diciembre del 2018. Seleccionando aleatoriamente 200 árboles por municipio, éstos se georreferenciaron geográficamente utilizando un

Abstract. The present study contributes to the knowledge of the spatial distribution of anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*) in avocado orchards in the State of Mexico. The study was carried out in the municipalities of Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra and Temascaltepec. Geostatistical methods were used to determine the spatial distribution of anthracnose. Samples were conducted biweekly during the months of July to December 2018. By randomly selecting 200 trees per municipality, they were geographically geo-referenced using a Trimble eTrex model navigator. The spatial distribution of anthracnose in avocado cultivation showed differences in each of the municipalities evaluated, adjusting to different geostatistical models (Gaussian, spherical and exponential), which were validated by the cross-validation method. The spatial distribution of anthracnose was obtained with maps drawn up through ordinary kriging. These maps revealed that the municipality of Tenancingo had the highest anthracnose density, compared to the municipalities of Coatepec

navegador Trimble modelo eTrex. La distribución espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate mostró diferencias en cada uno de los municipios evaluados, ajustándose a diferentes modelos geostatísticos (gaussiano, esférico y exponencial), mismos que fueron validados mediante el método de validación cruzada. La distribución espacial de la antracnosis se obtuvo con mapas elaborados a través del krigeado ordinario. Estos mapas revelaron que el municipio de Tenancingo presentó la mayor densidad de antracnosis, respecto a los municipios de Coatepec Harinas, Temascaltepec y Donato Guerra. La distribución espacial de la antracnosis en los cuatro municipios presento agregación y focos de infección localizados. En este estudio se concluye que los métodos geoestadísticos son una alternativa para mejorar los programas de manejo de enfermedades como la antracnosis y ayudan conducir de manera adecuada el control.

Palabras clave: *Persea americana*, *Colletotrichum gloeosporioides*, semivariograma

En México, uno de los cultivos agrícolas más importantes económicamente es el aguacate (*Persea americana*). En los últimos años, el número de hectáreas plantadas de este cultivo ha incrementado de manera considerable (231,028 ha) (SIAP, 2018); la producción de aguacate en el país se concentra principalmente en el estado de Michoacán, siendo reconocido como el mayor productor y exportador a nivel nacional, seguido de los estados Jalisco, Nayarit y el Estado de México, cuya producción de este último se centra particularmente en los municipios de Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenancingo, Villa de Allende, Donato Guerra y recientemente, en el municipio de Ocuilan (SENASICA, 2019).

El aguacate es uno de los productos que México exporta al mundo; cada día, la demanda comercial

Harinas, Temascaltepec and Donato Guerra. The spatial distribution of anthracnose in the four municipalities presented aggregation and localized sources of infection. This study concludes that geostatistical methods are an alternative to improve disease management programs such as anthracnose and help to adequately conduct control.

Key words: *Persea americana*, *Colletotrichum gloeosporioides*, semivariogram

One of the most important crops in Mexico, in economic terms, is avocado (*Persea americana*). In recent years, the number of hectares planted with this crop has increased considerably (231,028 ha) (SIAP, 2018); the avocado production in the country is focused mainly in the state of Michoacán, which is known as the main producing and exporting region in the country, followed by the states of Jalisco, Nayarit and the State of Mexico, the latter having a production focused mainly on the municipalities of Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenancingo, Villa de Allende, Donato Guerra, and recently, Ocuilan (SENASICA, 2019).

Avocado is one of the products that Mexico exports to the rest of the world, and the international commercial demand for this fruit is growing every day, which requires high quality standards in production. Phytosanitary management and control aspects have become one of the main concerns for the avocado production sector, since pests and diseases found in orchards have limited the quality of the fruits and their commercialization (Orozco *et al.*, 2017). One of the phytosanitary problems that limit avocado production is anthracnose, one of the most frequent diseases, particularly in post-harvest (Maeda, 2014). The symptoms of this disease are caused by species of phytopathogenic fungi of the deuteromycetes or fungi imperfecti, and mostly by those belonging to the genus *Colletotrichum*

de este frutal a nivel internacional es mayor, por lo que se busca que la producción sea de calidad; aspectos de manejo y control fitosanitarios se han convertido en una de las principales preocupaciones para el sector productivo aguacatero; plagas y enfermedades que se presentan en los huertos han limitado considerablemente la calidad de los frutos y su comercialización (Orozco *et al.*, 2017). Uno de estos problemas fitosanitarios que limitan la producción de aguacate es la antracnosis, una de las enfermedades que se presenta con mayor frecuencia, sobretodo en poscosecha (Maeda, 2014). Los síntomas de esta enfermedad son causados por especies de hongos fitopatógenos del grupo de los deuteromicetes u hongos imperfectos, principalmente, por las pertenecientes al género *Colletotrichum* (anamorfo), como *C. hymenocallidis* y *C. siamense*, mismas que han sido recientemente reconocidas como causantes de antracnosis en el cultivo de aguacate (Trinidad, 2017), sin embargo, la especie que es considerada altamente patógena para este cultivo es *Colletotrichum gloeosporioides* (Rojo-Báez *et al.*, 2017).

Se ha documentado ampliamente a *C. gloeosporioides* como un hongo fitopatógeno que permanece en estado de latencia en los huertos de aguacate, esperando condiciones ambientales propicias para su desarrollo y dispersión, tales como humedad relativa arriba del 90% y temperatura por debajo de los 29 °C (Basulto *et al.*, 2011). Algunos de los síntomas característicos que se presentan en las hojas, flores y frutos suelen ser marchitez de puntas, clavo o viruela, sarampión, entre otros, generando, a su vez, manchas irregulares de tonalidades salmonadas que posteriormente se tornan grisáceas, marrones o negras debido a la presencia de apressorios, acérvulos y conidios (Maeda, 2014).

Kermack y McKendric (1927) son reconocidos en la ciencia por sus aportes significativos a la Epidemiología, cuyos trabajos llevaron a la comprensión

(anamorfo), such as *C. hymenocallidis* and *C. siamense*, which have recently been known to cause anthracnosis in avocado crops (Trinidad, 2017). However, the species considered to be highly pathogenic for this crop is *Colletotrichum gloeosporioides* (Rojo-Báez *et al.*, 2017).

Colletotrichum gloeosporioides has been widely documented as a phytopathogen that remains in a state of latency in avocado orchards, waiting for adequate conditions for its development and dispersal, such as a relative humidity above 90% and a temperature below 29 °C (Basulto *et al.*, 2011). Some of the characteristic symptoms that appear on leaves, flowers and fruits are usually wilted tips, clove or smallpox, measles, and others, producing, in turn, irregular, salmon-colored spots that later turn grayish, maroon or black due to the presence of apressories, acervuli and conidia (Maeda, 2014).

Kermack and McKendric (1927) are known in science for their significant contributions to epidemiology, since their work has led to an understanding of the dynamics of the diseases, developing a system of mathematical equations with a reach that is currently applied in different fields of research, including agriculture, where these mathematical bases help understand, compare and predict the spatial and temporary behavior of plant diseases (Torres *et al.*, 2010).

Authors such as Breilh (2007) refer to epidemiological studies related to the importance of agricultural activity in diverse ecosystems, as well as their negative impacts. Likewise, Monsalve (2013) refers to the fact that in agriculture it is highly important to know and control the spatial variability that appears in most of the phenomena observed, and therefore the search for new alternatives of spatial modelling becomes necessary. Due to this, methodologies derived from spatial statistics, mainly Geostatistics, have been

de la dinámica de las enfermedades, desarrollando un sistema de ecuaciones matemáticas cuyo alcance se aplica actualmente en diferentes campos de investigación, entre ellos, la agricultura, donde éstos fundamentos matemáticos permiten conocer, comparar y predecir el comportamiento espacial y temporal de las enfermedades en las plantas (Torres *et al.*, 2010).

Autores como Breilh (2007) hacen referencia a estudios epidemiológicos relacionados con la importancia de la actividad agrícola en los diversos ecosistemas así como sus impactos negativos. Por su parte, Monsalve (2013) hace referencia al hecho de que en la agricultura, es transcendental conocer y controlar la variabilidad espacial que se presenta en la mayoría de los fenómenos observados, por tanto, se hace necesaria la búsqueda de nuevas alternativas de modelización espacial. Es así, que metodologías derivadas de la estadística espacial, propiamente la Geoestadística, han sido ampliamente utilizadas en el análisis de distribuciones de plagas y enfermedades agrícolas, así como su interacción con el ambiente y otras variables abióticas, considerando al espacio geográfico como “un conjunto de sitios ocupados por plantas enfermas, sanas, expuestas o removidas” en donde resulta necesario conocer la dinámica espacial que siguen (Riley *et al.*, 2016). Debido a la importancia del cultivo de aguacate y de la antracnosis para el Estado de México, el objetivo de este trabajo consistió en analizar su distribución espacial en cuatro municipios productores, utilizando herramientas derivadas de la estadística espacial, es decir, Geoestadística.

El estudio se llevó a cabo en Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra y Temascaltepec, considerando 200 árboles de aguacate del cultivar Hass en cada municipio, mismos que fueron seleccionados de manera aleatoria y georreferenciados con un GPS diferencial marca Trimble. Los criterios que se consideraron para la selección de estos árboles incluyeron el rango de edad, el cual osciló entre los

widely used in the analysis of agricultural pest and disease distribution, as well as their interaction with the environment and other abiotic variables, considering the geographic space as “a set of locations covered by diseased, healthy, exposed or removed plants” where it is crucial to understand the spatial dynamics they follow (Riley *et al.*, 2016). Due to the importance of the avocado crop and anthracnosis for the State of Mexico, the aim of this work was to analyze their spatial distribution in four producing municipalities, using tools derived from spatial statistics, i.e., Geostatistics.

The study was carried out in Coatepec Harinas, Tenancingo, Donato Guerra and Temascaltepec, considering 200 avocado trees of the Hass cultivar in each municipality, all of which were selected at random and georeferenced using a Trimble brand GPS. One criterion followed for the selection of these trees included the age range, which fluctuated between 5 and 10 years. In addition, we verified that the agronomic management was carried out in a similar fashion in the four municipalities, observing that the owners of the trees only carried out culture controls occasionally.

Likewise, out of each georeferenced tree, 12 branches were considered, four in each of the strata of the trees (upper, middle and lower), and in turn, 12 fruits with symptoms of anthracnosis were considered (four for every stratum of the trees), in which the incidence was obtained by taking 0 to 12 diseased fruits per tree as a reference (Ávila *et al.*, 2004). It is worth mentioning that in sampled plots, avocado is planted only for local commerce, and its agricultural management is minimum, with a traditional control of pests and diseases, as mentioned above. Samples were taken fortnightly between July and December of the year 2018, for a total of 48 samplings (modified from Rivera *et al.*, 2018).

To identify the causal agent, samples were taken from infected fruits, then taken to the

cinco y 10 años, además se verificó que el manejo agronómico fuera llevado de manera similar en los cuatro municipios, observando que los dueños de los árboles sólo realizaron control cultural de manera ocasional.

Así mismo, de cada árbol georreferenciado se consideraron 12 ramas, cuatro en cada uno de los estratos de los árboles (alto, medio y bajo), y, a su vez, se seleccionaron 12 frutos con síntomas de antracnosis (cuatro por cada estrato del árbol), mismos donde la incidencia se obtuvo tomando como referencia de cero hasta 12 frutos enfermos por árbol (Ávila *et al.*, 2004)., cabe mencionar que en las parcelas muestreadas se cultiva aguacate únicamente para comercio local y cuyo manejo agronómico es mínimo, controlando las plagas y enfermedades de manera tradicional, como se mencionó anteriormente. Cada muestreo se llevó a cabo cada 14 días durante los meses de julio a diciembre del año 2018, teniendo un total de 48 muestreos (modificado de Rivera *et al.*, 2018).

Para la identificación del agente causal se tomaron muestras de frutos infectados, los cuales fueron llevados al laboratorio de Fitopatología del Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEM para la identificación y observación de *Colletotrichum gloeosporioides*, mismos que fueron colocados en cámaras húmedas y puestos dentro de una incubadora a 24 °C, después de 7 días las muestras fueron revisadas y se realizaron siembras de tejido enfermo en medio de cultivo papa-dextrosa-agar (PDA), de acuerdo a la metodología empleada por Morales y Ángel (2007), realizando una caracterización morfológica de cepas monoco nidiales, las cuales se sembraron nuevamente en PDA y fueron colocadas en una incubadora a 24 °C.

Las características consideradas para la identificación morfológica de las cepas fueron el color, la consistencia y el tipo de crecimiento del micelio;

Phytopathology Lab of the Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento de la Facultad de Ciencias Agrícolas of the UAEM for the identification and observation of *Colletotrichum gloeosporioides*, which were placed in wet chambers and placed in an incubator at 24 °C. After 7 days, the samples were checked and diseased tissue was planted in a potato-dextrose-agar (PDA) medium, following the methodology by Morales and Ángel (2007), performing a morphological characterization of monoconidial strains, which were replanted in PDA and placed in an incubator at 24 °C.

The characteristics considered for the morphological identification of the strains were color, the consistency and the type of myceliar growth, direction and length of hyphae on the edge of the culture, color and shape of culture, and the presence of concentric rings. It is worth mentioning that this procedure was carried out only to corroborate that this was the fungal species reported in literature as the causal agent of anthracnosis for avocado in Mexico (Rojo-Báez *et al.*, 2017).

In the samplings performed, we were able to identify symptoms of anthracnosis in trees from all four municipalities, therefore it is convenient to infer that this disease has a wide distribution. The symptoms found in the trees ranged from small dark spots on the pericarp of the fruits to larger, maroon to dark brown lesions, in which small acervuli-conidia-forming structures could be noticed at plain sight. Additionally, larger necrotic lesions with irregular and sunken edges were noticed, coinciding largely with reports by Morales and Ángel (2007), and by Aquino *et al.* (2008), who mention the presence of black, sunken, irregularly-shaped lesions with salmon-colored spores (conidia) on the fruits.

On the other hand, it is worth pointing out that anthracnosis symptoms appeared in the first stages

dirección y longitud de las hifas del borde del cultivo; color y forma del cultivo; coloración del centro del cultivo y la presencia de anillos concéntricos; cabe mencionar que este procedimiento se llevó a cabo únicamente con la finalidad de corroborar que se trataba de la especie fúngica reportada en la literatura como el agente causal de la antracnosis para el aguacate en México (Rojo-Báez *et al.*, 2017).

En los muestreos realizados se logró identificar síntomas de antracnosis en árboles de los cuatro municipios, por lo cual es conveniente inferir que ésta enfermedad presenta una amplia distribución; los síntomas encontrados en los árboles variaron desde pequeñas manchas oscuras sobre el pericarpio de los frutos, pasando también por lesiones mayores de colores marrón o café oscuro, en donde se podían apreciar pequeños acérvulos a simple vista, siendo estas las estructuras formadoras de conidios, así mismo, se encontraron lesiones necróticas de mayor tamaño con bordes irregulares y hundidos, coincidiendo en gran parte con lo reportado Morales y Ángel (2007) y por Aquino *et al.* (2008) quienes mencionan la presencia de lesiones hundidas, negras de forma irregular, con masas de esporas salmonadas (conidios) en los frutos.

Por otro lado, cabe destacar que los síntomas de antracnosis se presentaron en las primeras etapas de desarrollo de los frutos, comprobando lo propuesto por Juárez *et al.* (2010), quienes afirman que la infección ocurre en etapas tempranas del crecimiento, sin embargo, las lesiones típicas de la enfermedad aparecen hasta que dichos frutos alcanzan la etapa de maduración.

Una vez integradas las bases de datos obtenidos en los muestreos de frutos de aguacate con antracnosis, se llevó a cabo el análisis geoestadístico, comenzando con la estimación de los semivariogramas experimentales a partir de la incidencia obtenida en los muestreos, utilizando el software Variowin 2.2 (Software para el análisis de datos espaciales en 2D. Primavara Verlag, New York;

of fruit development, confirming the proposal by Juárez *et al.* (2010), who states that the infections take place in the early growth stages, although the lesions typical of the disease appear when the fruits reach the stage of maturity.

After integrating the data bases obtained in the samplings of avocado fruits with anthracnosis, the geostatistical analysis was carried out, starting with the estimation of the experimental semivariograms from the incidence obtained in the samplings, using the software Variowin 2.2 (Software for the analysis of spatial data in 2D. Primavara Verlag, New York; U.S.A.) (Maldonado *et al.*, 2017). The experimental semivariograms were adjusted to theoretical models, which tend to be spherical, gaussian, exponential, with a pure nugget effect, logarithmical, monomic and with a hole effect, where the plateau, range and effect parameters and nugget effect are modified until validation statistics are obtained which are adequate and help mathematically approve the adjusted models, such as the Standard Error of the Mean (SEM), Mean Squared Error (MSE) and the Dimensionless Mean Squared Error (DMSE) (Ramírez, 2012; Acosta *et al.*, 2018).

The experimental value of the semivariogram was calculated using the following expression (Isaaks and Srivastava, 1989; Journel and Huijbregts, 1978):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i+h) - z(x_i)]^2$$

Where $\gamma^*(h)$ is the experimental value of the semivariogram for the distance interval h , $N(h)$ is the number of pairs of sample points separated by the distance interval h , $z(x_i)$ is the value of the variable of interest for the sample point x_i , and $z(x_i+h)$ is the value of the variable of interest in the sample point x_i+h .

This work included the production of 48 semivariograms, which show that anthracnosis in

EEUU) (Maldonado *et al.*, 2017). Los semivariogramas experimentales fueron ajustados a modelos teóricos, los cuales suelen ser esféricos, gaussianos, exponenciales, de efecto pepita puro, logarítmicos, monómicos y de efecto agujero, donde los parámetros de meseta, rango y efecto pepita se van modificando hasta obtener estadísticos de validación que sean adecuados y permitan aprobar matemáticamente los modelos ajustados, tales como la Media de los Errores de Estimación (MEE), Error Cuadrático Medio (ECM) y Error Cuadrático Medio Adimensional (ECMA) (Ramírez, 2012; Acosta *et al.*, 2018).

El valor experimental del semivariograma fue calculado con la siguiente expresión (Isaaks y Srivastava, 1989; Journel y Huijbregts, 1978):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i+h) - z(x_i)]^2$$

Donde: $\gamma^*(h)$ es el valor experimental del semivariograma para el intervalo de distancia h ; $N(h)$ es el número de pares de puntos muestrales separados por el intervalo de distancia h ; $z(x_i)$ es el valor de la variable de interés en el punto muestral x_i , y $z(x_i+h)$ es valor de la variable de interés en el punto muestra x_i+h .

En este trabajo se elaboraron 48 semivariogramas, los cuales, demuestran que la antracnosis en el cultivo de aguacate presentó una distribución espacial de tipo agregado, ajustándose a modelos de tipo gaussiano y exponencial en los cuatro municipios, aunque también se presentaron modelos esféricos en varias fechas de muestreo (Cuadro 1), interpretando de esta forma que la antracnosis presenta un crecimiento acelerado a través del tiempo, y que en algún momento, es posible que permanezca constante y con tendencia a incrementarse en toda la superficie de la zona de estudio. Quiñones *et al.* (2016) mencionan que los modelos gaussia-

the avocado crops presented a spatial distribution of an aggregate sort, adjusting to gaussian and exponential models in the four municipalities, although spherical models also appeared in several sampling dates (Table 1), therefore interpreting that anthracnosis presents accelerated growth in time; it is possible that it remains constant and with a tendency to increase throughout the surface of the area of study. Quiñones *et al.* (2016) mention that the gaussian models may help explain the variability and capacity of the diseases to spread, and hence this study explains that the spatial continuity of anthracnosis was explained with the radial extension it covered, i.e., that the appearance of the disease in a tree led to the infection of adjacent trees.

This aggregation of the disease became particularly evident in the months of August, September, October, November and December, when changes in rainfalls, temperature and humidity were variable. However, in the remaining samplings, the disease remained constant in the sampled areas, mainly in Coatepec Harinas. This helps infer the existence of favorable weather conditions (ideal temperature and humidity, physiographical differences that allow for the accumulation of rain or irrigation water, etc.). Likewise, Fisher *et al.* (2012), mention that the high incidences of diseases such as anthracnosis are widely related to the resistance of phytopathogens such as *C. gloeosporioides*.

Regarding the adjusted parameters that helped validate the models, it is appropriate to mention the importance of the range, since it lies in explaining the distance at which there is association between the data sampled. The nugget effect represents the origin of the semivariogram, while the plateau is the highest point in which the data intersect; the level of spatial dependence was obtained by dividing the nugget effect between the plateau, explaining

Cuadro 1. Parámetros del semivariograma de los muestreos de Antracnosis de julio a diciembre, 2018.
Table 1. Parameters of the semivariogram of the anthracnosis samples between July and December, 2018.

Muestreo	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Rango	Meseta	PEP/Meseta (%)	Nivel de dependencia espacial
Coatepec Harinas								
JUL-01	6.02	14.47	Esférico	0	20	12.3	0	ALTA
JUL-02	6.92	7.2	Gaussiano	0	19.194	6.716	0	ALTA
AGO-01	9.67	2.07	Expo.	0	19.2	1.806	0	ALTA
AGO-02	9.6	2.67	Expo.	0	28	2.052	0	ALTA
SEP-01	6.21	12.27	Gaussiano	0	24	11.44	0	ALTA
SEP-02	5.77	11.39	Expo.	0	20.8	9.96	0	ALTA
OCT-01	6.26	12.72	Expo.	0	19.2	11.83	0	ALTA
OCT-02	6.02	13.45	Gaussiano	0	17.6	11.34	0	ALTA
NOV-01	6.15	12.6	Gaussiano	0	19.2	11.6	0	ALTA
NOV-02	6.07	10.62	Expo.	0	17.6	9.02	0	ALTA
DIC-01	6.11	11.73	Expo.	0	22.4	10.92	0	ALTA
DIC-02	6.07	12.37	Expo.	0	19.2	11.57	0	ALTA
Tenancingo								
JUL-01	8.92	6.87	Gaussiano	0	22	2.553	0	ALTA
JUL-02	6.19	12.68	Gaussiano	0	20	8.84	0	ALTA
AGO-01	9.75	2.08	Expo.	0	19.2	1.8	0	ALTA
AGO-02	6.065	11.15	Expo.	0	30	9	0	ALTA
SEP-01	6.19	12.55	Expo.	0	28	10.4	0	ALTA
SEP-02	6.04	12.48	Gaussiano	0	22	10.08	0	ALTA
OCT-01	6.01	11.1	Gaussiano	0	22	10.08	0	ALTA
OCT-02	5.89	12.14	Esférico	0	25.6	10.14	0	ALTA
NOV-01	5.56	12.5	Gaussiano	0	17.6	10.92	0	ALTA
NOV-02	6.4	13.24	Expo.	0	22.4	11.76	0	ALTA
DIC-01	5.55	12.43	Gaussiano	0	19.2	11.44	0	ALTA
DIC-02	6.1	11.86	Expo.	0	19.2	10.92	0	ALTA
Donato Guerra								
JUL-01	6.55	8.14	Expo.	0	27.2	6.63	0	ALTA
JUL-02	7.65	7.18	Gaussiano	0	22.5	4.6	0	ALTA
AGO-01	9.04	5.008	Gaussiano	0	17.6	4.26	0	ALTA
AGO-02	6.05	12.46	Esférico	0	20.8	10.01	0	ALTA
SEP-01	5.57	9.94	Expo.	0	22.8	8.3	0	ALTA
SEP-02	5.94	11.96	Expo.	0	20.9	9.12	0	ALTA
OCT-01	5.86	12.36	Expo.	0	28	11.32	0	ALTA
OCT-02	5.89	11.55	Gaussiano	0	17.6	10.8	0	ALTA
NOV-01	5.51	11.98	Esférico	0	20.8	10.56	0	ALTA
NOV-02	6.02	11.39	Expo.	0	22	8.88	0	ALTA
DIC-01	6.49	10.97	Expo.	0	19.2	10.27	0	ALTA
DIC-02	5.85	13.51	Esférico	0	22.4	11.6	0	ALTA
Temascaltepec								
JUL-01	6.37	7.77	Gaussiano	0	20.8	7.33	0	ALTA
JUL-02	5.94	12.61	Gaussiano	0	22.8	12.22	0	ALTA
AGO-01	9.51	2.77	Expo.	0	26.6	2.24	0	ALTA
AGO-02	5.98	12.22	Esférico	0	22.4	10.08	0	ALTA
SEP-01	5.83	11.47	Expo.	0	20.8	10.92	0	ALTA
SEP-02	6.11	12.52	Gaussiano	0	16	10.14	0	ALTA
OCT-01	6.18	11.91	Expo.	0	19.2	9.84	0	ALTA
OCT-02	5.85	13.7	Gaussiano	0	17.6	11.62	0	ALTA
NOV-01	6.09	11.66	Expo.	0	27.2	10.44	0	ALTA
NOV-02	5.89	10.33	Gaussiano	0	19.52	9.54	0	ALTA
DIC-01	5.95	12.43	Gaussiano	0	20.8	10.34	0	ALTA
DIC-02	6.09	11.04	Gaussiano	0	19.2	10.08	0	ALTA

01) Primer muestreo, 02) Segundo muestreo / 01) First sampling, 02) Second sampling.

nos permiten explicar la variabilidad y la capacidad de diseminación de las enfermedades, por lo que en este estudio, se explica que la continuidad espacial de antracnosis se explicó con la extensión radial que ocupó, es decir, que la aparición de la enfermedad en un árbol llevó a la infección de los árboles aledaños.

Esta agregación de la enfermedad se hizo más evidente sobre todo durante los meses de agosto, septiembre, noviembre y diciembre, cuando los cambios en la precipitación, temperatura y humedad fueron variables, sin embargo, en los muestreos restantes, la enfermedad permaneció constante en las zonas muestreadas, sobretodo en Coatepec Harinas; lo anterior, permite inferir la existencia de condiciones ambientales favorables (temperatura y humedad idóneas, diferencias fisiográficas que permiten la acumulación de agua de riego o de lluvia, etc.). Así mismo, Fisher *et al.* (2012), mencionan que las altas incidencias de las enfermedades como la antracnosis están estrechamente relacionadas a la capacidad de resistencia que poseen los fitopatógenos como *C. gloeosporioides*.

En cuanto a los parámetros ajustados que permitieron validar los modelos es conveniente mencionar la importancia del rango, ya que radica en explicar a qué distancia existe asociación entre los datos muestreados. El efecto pepita, representa el origen del semivariograma, mientras que la meseta es el punto máximo donde existe intersección entre los datos; el nivel de dependencia espacial se obtuvo al dividir el efecto pepita entre la meseta, expresando el resultado en porcentaje (Ramírez, 2012). Es así que los valores de alcance de la enfermedad para los muestreos exponenciales, esféricos y gaussianos presentaron valores desde 19.2 m hasta 28 m (Cuadro 1).

El efecto pepita para todos los modelos ajustados fue igual a cero (Cuadro 1), que de acuerdo con Twizeyimana *et al.* (2008), puede ser interpretado

the result as a percentage (Ramírez, 2012). In this way, the values of the reach of the disease for the exponential, spherical and gaussian samplings displayed values between 19.2 m and 28 m (Table 1).

The nugget effect for all the models adjusted was equal to zero (Table 1), which, according to Twizeyimana *et al.* (2008), can be interpreted as a high level of aggregation of the incidence of the disease. This study created maps through kriging, to estimate the percentages of the surface infected and the values related to non-sampled points. In this way, it was possible to view the spatial distribution of the disease for each municipality and sampling date. These maps were obtained using the software Surfer 9 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. U.S.A.).

The 48 maps created clearly show points or centers of aggregation, which remained constant from beginning to end of the sampling period. This indicates that the disease is present in these areas, and is latent and constant, waiting for favorable conditions that help it proliferate. These infection patches in the map are assumed to be the main sources of infection from which the disease originates, and from where it is distributed to the entire sampled area (Figures 1 A, B, C, D). In regard to this, Cárdenas *et al.* (2017) mention that the semivariograms and the maps created with kriging help identify sources of infection of diseases. At the same time, they suggest that Geostatistics is a tool that helps explain the spatial arrangement followed by the diseases in plantations, thus contributing to accurate and timely decision-making processes, contributing to the creation of integrated management strategies.

The highest percentage of infected surface in the municipality of Coatepec Harinas was 100% in July, August, November and December, whereas in Donato Guerra, it was 100% only for the first

como un alto nivel de agregación de la incidencia de la enfermedad. En este estudio se generaron mapas a través del krigado, para estimar los porcentajes de superficie infectada y los valores asociados a puntos no muestreados, de esta manera fue posible visualizar la distribución espacial de la enfermedad para cada municipio y fecha de muestreo. Éstos mapas se obtuvieron con el software Surfer 9 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA).

Los 48 mapas elaborados muestran claramente puntos o centros de agregación, mismos que se mantuvieron constantes desde el inicio y hasta el final del periodo de muestreo, esto denota que la enfermedad se presenta en esas zonas, y además se mantiene latente y constante, esperando que surjan condiciones favorables que le permitan proliferar. Se asume que esos parches de infección presentes en los mapas, son los principales focos de infección de donde surge la enfermedad y desde donde se distribuye a toda la zona muestreada (Figura 1 A, B, C, D). Con respecto a lo anterior, Cárdenas *et al.* (2017) mencionan que los semivariogramas y los mapas generados a través del krigado permiten identificar focos de infección de las enfermedades, y, a su vez, sugieren que la Geostatística es una herramienta que permite dar explicación al arreglo espacial que siguen las enfermedades en los cultivos, y de esta manera contribuir a la toma de decisiones precisas y oportunas, contribuyendo a la generación de estrategias de manejo integrado.

El porcentaje de superficie infectada más alto en el municipio de Coatepec Harinas fue de 100% en julio, agosto, noviembre y diciembre mientras que para Donato Guerra fue de 100% únicamente para el primer muestreo del mes de noviembre, sin embargo, para el segundo muestreo de ese mismo mes, el porcentaje de infección se redujo un 21% en ese municipio.

En el municipio de Temascaltepec, al igual que en los municipios anteriores, también se presenta-

sampling in November, although for the second sampling in the same month, the percentage of infection decreased by 21% in that municipality.

In the municipality of Temascaltepec, as in the municipalities mentioned above, percentages of 100% for the infection of the disease were also displayed. In July, October, November and December, the rest of the samplings, these percentages of infection also remained above 90%, with the exception of the last sampling, whose infection value was 86%. Likewise, in the municipality of Tenancingo, the percentages of infection by *C. gloeosporioides* remained between 87 and 100%, the latter percentage found in the second sampling of September and the first one in October.

Due to the above, in all the samplings performed in the four municipalities, the level of spatial dependence was high in all cases, suggesting that a correct sampling scale was used and the error was minimal (Table 1). This is also confirmed by the high spatial dependence displayed in all samplings, which proved the existing correlation between the data. Therefore, these results coincide with reports by Quiñones *et al.* (2016), who suggest that the high spatial dependence is an indicator of the relationship between the georeferenced data and the nature of the variable under study, considering the size, shape and configuration of the spatial units.

In conclusion, anthracnosis in avocado displayed an aggregate spatial behavior; we found clearly defined aggregation centers, which remained constant during the six months of sampling in all the areas of study. The spatial distribution was adjusted to gaussian, exponential and spherical models, which helped explain the spatial dependence of the anthracnosis found in the four municipalities. Geostatistics has proven to be one of the methodologies used in the agricultural sector which has been efficient for the analysis

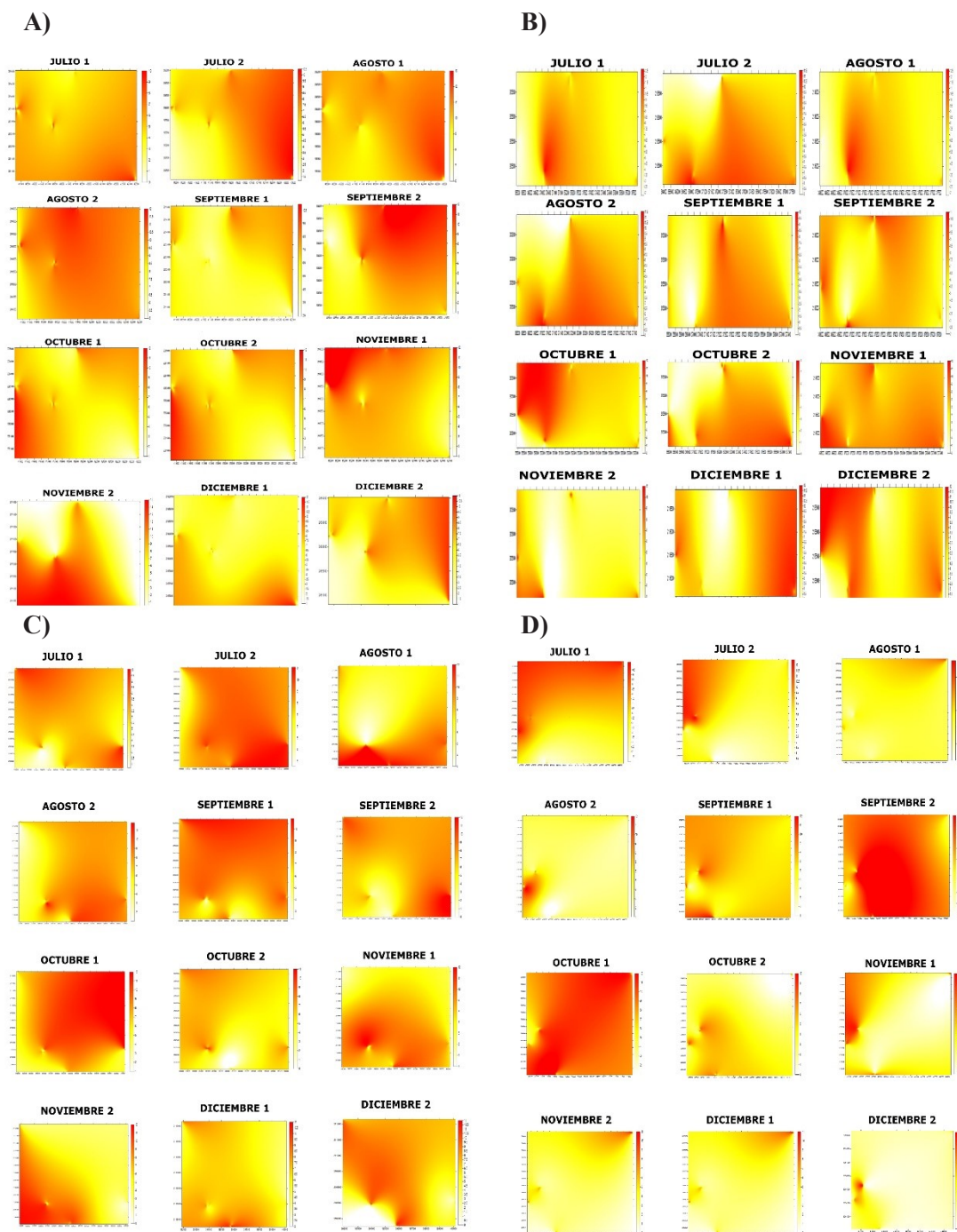


Figura 1. Mapas de incidencia de infección de antracnosis en frutos de aguacate en el Estado de México por municipio A) Coatepec Harinas, B) Donato Guerra, C) Temascaltepec y D) Tenancingo.

Figure 1. Anthracnose infection incidence maps in avocado fruits in the State of Mexico by municipality A) Coatepec Harinas, B) Donato Guerra, C) Temascaltepec and D) Tenancingo.

ron porcentajes de infección de la enfermedad del 100%, en julio, octubre, noviembre y diciembre, el resto de los muestreos, estos porcentajes de infección se mantuvieron por arriba del 90%, a excepción del último muestreo, cuyo valor de infección fue de 86%. Así mismo, en el municipio de Tenancingo, los porcentajes de infección por *C. gloeosporioides* se mantuvieron entre el 87 y el 100%, encontrando esta totalidad en el segundo muestreo de septiembre y el primero de octubre.

Por lo mencionado anteriormente, en todos los muestreos realizados para los cuatro municipios, el nivel de dependencia espacial fue alto en todos los casos, lo que sugiere que se utilizó una escala de muestreo correcta y el error fue mínimo (Cuadro 1). Esto también se corrobora debido a la alta dependencia espacial que se presentó en todos los muestreos, misma que demostró la correlación existente entre los datos. Por lo que estos resultados coinciden con lo reportado por Quiñones *et al.* (2016), quienes sugieren que la alta dependencia espacial es un indicador que refiere la relación entre los datos georreferenciados y a la naturaleza de la variable bajo estudio, considerando el tamaño, forma y configuración de las unidades espaciales.

En conclusión, la antracnosis en el aguacate presentó un comportamiento espacial agregado, encontrando centros de agregación claramente definidos, los cuales se mantuvieron constantes durante los seis meses de muestreo en todas las zonas de estudio. La distribución espacial se ajustó a modelos gaussianos, exponenciales y esféricos, permitiendo explicar la dependencia espacial que se presentó de la antracnosis en los cuatro municipios. La Geostatística ha demostrado ser una de las metodologías empleadas en el sector agrícola que ha sido eficaz en el análisis de las distribuciones espaciales de las enfermedades de los cultivos, facilitando a su vez, la adecuada, pertinente y oportuna toma de decisiones acerca del manejo integrado. Los resultados sugieren

of spatial distributions of crop diseases, helping, in turn, to make adequate, pertinent and timely decisions on the integrated management. The results suggest carrying out preventive applications in the initial infection points, since it would have an effect on the change of the spatial patterns of the disease. Likewise, we propose applying curative fungicides at the appearance of the symptoms and on focus points in order to avoid the disease spreading onto the rest of the crop. Finally, this type of investigations contribute widely to minimizing both investment costs and the environmental impact produced by the use of agrochemicals in the avocado producing areas of the State of Mexico.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the National Science and Technology Council for the scholarship granted for Graduate studies. To the avocado producers in the State of Mexico for the collaboration in taking samples. Dedicated to Alfredo Ruiz Orta.

~~~~~ End of the English version ~~~~~

realizar aplicaciones preventivas en los puntos iniciales de infección, porque tendría un efecto en el cambio de los patrones espaciales de la enfermedad, así mismo, se propone realizar aplicaciones con fungicidas curativos al inicio de los síntomas y de forma focalizada para evitar la diseminación de la enfermedad al resto del cultivo. Así mismo, este tipo de investigaciones contribuyen ampliamente a minimizar, por una parte, los costos de inversión, y por otro lado, también a disminuir de alguna manera el impacto ambiental que se produce por el uso de agroquímicos en las regiones productoras de aguacate en el Estado de México.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para realizar los estudios de Posgrado. A los productores de aguacate del Estado de México por la colaboración para realizar los muestreos. Dedicado para Alfredo Ruiz Orta.

## LITERATURA CITADA

- Acosta-Guadarrama, AD, Ramírez-Dávila JF, Rivera-Martínez R, Figueroa-Figueroa DK, Lara-Díaz AV, Maldonado-Zamora FI y Tapia-Rodríguez A. 2017. Distribución Espacial de Trips spp. (Thysanoptera) y Evaluación de su Control Mediante el Depredador *Amblyseius swirskii* en el Cultivo de Aguacate en México. *Southwestern Entomologist*, 42: 435–446. <https://doi.org/10.3958/059.042.0214>
- Aquino MJG Vázquez GLM y Reyes RBG. 2008. Biocontrol *in vitro* e *in vivo* de *Fusarium oxysporum* Schlecht. f. sp. *dianthi* (Prill. y Delacr.) Snyder y Hans. Con hongos antagonistas nativos de la zona florícola de Villa Guerrero, Estado de México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 26:127-137. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v26n2/v26n2a5.pdf>
- Ávila-Quezada GD, Téliz-Ortiz D, Mora-Aguilera G, Vaquera-Huerta H y Tijerina-Chávez L. 2003. Spatial and temporal dynamic of scab (*Sphaceloma perseae* Jenk.) on avocado (*Persea americana* Mill.). *Revista Mexicana de Fitopatología* 21:152-160. <https://www.redalyc.org/pdf/612/61221209.pdf>
- Basulto SF, Díaz PR, Gutiérrez AO, Santamaría FJ y Larqué SA. 2011. Control de dos Especies de *Colletotrichum* causantes de Antracnosis en Frutos de Papaya Maradol. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2(5): 631-643 p. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&id=S2007-09342011000500001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&id=S2007-09342011000500001)
- Breilh J. 2007. Nuevo modelo de acumulación y agroindustria: las implicaciones ecológicas y epidemiológicas de la floricultura en Ecuador. *Ciência & Saúde Coletiva* 12(1):91-104. <http://www.scielo.br/pdf/csc/v12n1/09.pdf>
- Cárdenas PNJ, Darghan CAE, Sosa RMD y Rodríguez A. 2017. Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. *Acta Biológica Colombiana* 22: 209-220. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>
- Fisher MC, Henk DA, Briggs CH, Brownstein JS, Madoff L, McCraw L and Gurr S. 2012 Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature*. 484:7393. <https://doi.org/10.1038/nature10947>.
- Isaaks E and Srivastava M. 1988. Spatial continuity measures for probabilistic and deterministic geostatistics. *Mathematical Geology*, 20(4): 313-341. <https://doi.org/10.1007/BF00892982>
- Journel A and Huijbregts CJ. 1978. Mining geostatistics. London, Reino Unido: Academic Press.
- Juárez BGP, Sosa MME y López MA. 2010. Hongos fitopatógenos de alta importancia económica: descripción y métodos de control. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos* 4:2. 14-23. [https://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No4-Vol-2/TSIA-4\(2\)-Juarez-Becerra-et-al-2010.pdf](https://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No4-Vol-2/TSIA-4(2)-Juarez-Becerra-et-al-2010.pdf)
- Kermack, W O y McKendrick AG. 1927. “Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics”. *Proceedings of the Royal Society of London*. 115:700-721. [www.jstor.org/stable/94815](http://www.jstor.org/stable/94815).
- Maeda CNS. 2014. Anthracnose of papaya in Hawai'i. Mānoa (US): College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawai'i.
- Maldonado FI, Ramírez JF, Lara AV, Acosta DA, Rivera R y Rodríguez TA. 2017. Mapeo de la distribución espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en parcelas comerciales de aguacate Var. Hass en Coatepec Harinas, Estado de México. *Ecosistemas* 26(2): 52-60. <https://doi.org/19.7818/ECOS.2017.26-2.06>
- Monsalve GN. 2013. Modelos jerárquicos bayesianos espaciales en epidemiología agrícola. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/19161>
- Morales GJL y Ángel PME. 2007. Hongos fitopatógenos de importancia agrícola. Editorial Facultad de Agrobiología “Presidente Juárez” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán, México. 265 p.
- Orozco HME, García FB, Álvarez AG y Mireles LP. 2017. Tendencias del sector agrícola, Estado de México. *Quivera, Revista de Estudios Territoriales* 19(1): 99-121. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40153531006.pdf>
- Quiñones VR, Sánchez PJR, Pedraza EAK, Castañeda VA y Franco MO. 2016. Distribución espacial de la roya transversal (*Uromyces transversalis*) del gladiolo durante el ciclo primavera-verano en la región sureste del estado de México. *Rev. FCA UNCUIYO*. 48: 209-220. [http://revista.fca.uncu.edu.ar/images/stories/pdfs/201602/Cp15\\_Snchez\\_Pale.pdf](http://revista.fca.uncu.edu.ar/images/stories/pdfs/201602/Cp15_Snchez_Pale.pdf)
- Ramírez DJF. 2012. Geoestadística, principios básicos, aplicaciones y limitaciones. Primera edición. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. 135 pp.
- Riley MB, Williamson, MR and Maloy O. 2016. Plant disease diagnosis.
- Rivera MR, Ramírez DJF y Acosta GAD. 2018. Distribución espacial de las poblaciones de huevos de *Bactericera cockerelli* Sulc. en el cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Acta universitaria*, 28(5): 24-33. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1944>
- Rojo-Báez I, Álvarez-Rodríguez B, García-Estrada RS, León-Félix J, Sañudo-Barajas A y Allende-Molar R. 2017. Situación actual de *Colletotrichum* spp. en México: Taxonomía, caracterización, patogénesis y control. *Revista mexicana de fitopatología* 35(3): 549-570. <http://dx.doi.org/10.18781/r.mex.fit.1703-9>
- SENASICA. 2019. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (Consultado 11-oct-2018). <https://www.gob.mx/senasica>
- SIAP. 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (Consultado 11-1-2018 en <http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>)
- Software para el análisis de datos espaciales en 2D. Primavera Verlag, New York; EEUU
- Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA.

- Torres E, Tovar J y Ceballos LA. 2010. Tres procedimientos de análisis epidemiológico en palma de aceite e incorporación de atributos del paisaje. *Revista Palmas*, 31(especial): 403-415. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1545>
- Trinidad AE, Ascencio VF, Ulloa J, Ramírez, J, Ragazzo SJ, Calderón SM y Bautista RP. 2017. Identificación y caracterización de *Colletotrichum* spp. causante de antracnosis en aguacate Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 19:3953-3964. <https://doi.org/10.29312/remex-ca.v0i19.664>
- Twizeyimana M, Ojiambo PS, Sonder k, Ikotun, T, Hartman GL and Bandyopadhyay R. 2008. Pathogenic variation of *Phakopsora pachyrhizi* infecting soybean in Nigeria. *Phytopathology* 99: 353-361. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-4-0353>.