

Determinación del comportamiento espacial de antracnosis en el cultivo de aguacate utilizando estadística espacial

Determination of the spatial behavior of anthracnose in avocado cultivation using spatial statistics

Atenas Tapia Rodríguez¹ , José Francisco Ramírez Dávila^{2*} , Jesús Gaudencio Aquino Martínez²  y Alfredo Ruiz Orta³ 

¹ Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Toluca, Estado de México, México.

² Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Campus el Cerrillo. Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, México.

³ Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Tenancingo. Carretera Tenancingo-Villa Guerrero, km 1.5 Tenancingo, Estado de México. México.

*Autor para correspondencia:

jframirez@uaemex.mx

Conflicto de interés:

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Licencia:

Artículo publicado en acceso abierto con una licencia Creative Commons CC-BY

Contribución de autoría:

Todos los autores realizaron contribuciones sustanciales en la concepción y diseño de este estudio, al análisis e interpretación de datos, a la revisión del manuscrito y la aprobación de la versión final. Todos los autores asumen la responsabilidad por el contenido del manuscrito.

Historial:

Recibido: 08/12/2020
Aceptado: 09/08/2021

Periodo de Publicación:

Julio-Diciembre de 2021

RESUMEN

La antracnosis es una enfermedad fúngica presente en el cultivo de aguacate de manera recurrente, generando pérdidas económicas importantes para el sector productivo del Estado de México. Para focalizar las medidas de control, resulta importante conocer la distribución espacial y la dinámica que siguen las enfermedades como la antracnosis a través de métodos geostatísticos. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue determinar el comportamiento espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate Hass en Coatepec Harinas y Tenancingo, dos municipios productores del Estado de México. Se muestrearon cuatro hectáreas, estableciendo 40 cuadrantes en cada una, y en cada una de ellas, 10 árboles de aguacate cultivar Hass de 10 años fueron georeferenciados con un DGPS y utilizados para medir la incidencia de síntomas de antracnosis en 12 frutos. Los datos fueron analizados con el software Variowin 2.2 y los mapas generados con el programa Surfer 16. Los mapas elaborados muestran centros de agregación, y los semivariogramas sugieren una distribución ajustada en su mayoría a modelos de tipo gaussiano y exponencial; con rangos que fluctúan entre los 12 y los 56 metros, indicando asociación entre los datos; el mayor porcentaje de superficie infectada fue de 99% para el primer muestreo de abril, mientras para el primer muestreo de noviembre, el mayor porcentaje fue de 98% en ambos municipios. El índice de distancia para la regularidad Ia corroboró la existencia de focos de agregación en todos los muestreos, al igual que los valores obtenidos del índice de agrupamiento Ja.

Palabras clave: *Colletotrichum gloeosporioides*, krigeado ordinario, agregación, aguacate

ABSTRACT

Anthraco-nose is a fungal disease that is present in avocado crops on a recurring basis, generating significant economic losses for the productive sector of the State of Mexico. To focus control measures, it is important to know the spatial distribution and dynamics that diseases such as anthracnose follow through geostatistical methods. For this reason, the objective of this study was to determine the spatial behavior of anthracnose in the Hass avocado crop in Coatepec Harinas and Tenancingo, two producing municipalities in the State of Mexico. Four hectares were sampled, establishing 40 quadrants in each one, and in each one of them, 10 10-year-old Hass avocado trees were georeferenced with a DGPS and used to measure the incidence of anthracnose symptoms in 12 fruits. The data were analyzed with the Variowin 2.2 software and the maps generated with the Surfer 16 program. The maps produced show aggregation centers, and the semivariograms suggest a distribution fitted mostly to Gaussian and exponential models; with ranges fluctuate between 12 and 56 meters, indicating an association between the data; the highest percentage of infected surface was 99% for the first sampling in April, while for the first sampling in November, the highest percentage was 98% in both municipalities. The distance index for the regularity Ia corroborated the existence of aggregation foci in all samplings, as well as the values obtained from the clustering index Ja.

Key words: *Colletotrichum gloeosporioides*, Kriging, aggregation, avocado

INTRODUCCIÓN

El aguacate (*Persea americana* L.) se ha convertido en un sistema agrícola eficiente en México durante los últimos años, aportando alrededor del 50% de la producción mundial (Food and Agriculture

Organization [FAO], 2020); no obstante, enfermedades como la antracnosis y la roña son reportadas por Trinidad Ángel et al. (2017) y Alfaro Espino, Morales García y Pedraza-Santos (2017), argumentando que los daños ocasionados por éstas, generan pérdidas económicas de hasta el 40%.

La antracnosis es una enfermedad fúngica provocada por hongos del complejo *Colletotrichum*, siendo *Colletotrichum gloeosporioides* el responsable de esta enfermedad en todos los municipios del Estado de México donde se cultiva aguacate. De acuerdo con Morales-García (1996) y Lemus-Soriano y Pérez Aguilar (2017), la incidencia de esta enfermedad oscila entre 42 a 74%, siendo una de las más importantes reportadas para este cultivo causando daños que dificultan su comercialización en mercados internacionales.

Considerando lo anterior, diversos estudios se han enfocado en conocer y analizar la distribución espacial de los organismos fitopatógenos a través de índices de dispersión y distribuciones estadísticas normales como los realizados por Vivas y Notz (2011) quienes determinaron la distribución espacial de *Oebalus insularis* en campos de arroz empleando el índice de Morisita la ley de potencia de Taylor, el índice de Iwao y el modelo matemático de la binomial negativa.

Sin embargo, la geoestadística y el Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE, por sus siglas en inglés, Spatial Analysis by Distance Indices) son metodologías que han demostrado ser de gran ayuda para el manejo de las plagas y enfermedades agrícolas, sobretodo en cultivos como el aguacate, cacao, mango, maíz, gladiolo, papa, entre otros (Rivera Martínez, Ramírez Dávila y Acosta Guadarrama, 2018). Además de ser también métodos utilizados en estudios ecológicos como el de Martínez-Martínez, N., Ramírez-Dávila, Lara-Vázquez & Figueroa-Figueroa (2021) quienes utilizaron el Análisis Espacial por Índices de Distancia para determinar la distribución espacial del muérdago enano en *Pinus pseudostrobus* de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca.

Es importante destacar que las metodologías empleadas para el análisis espacial de las enfermedades agrícolas, han ganado relevancia durante los últimos años, debido a la exactitud de éstas para la obtención de datos espaciales que facilitan la toma de decisiones eficientes y oportunas, brindando certeza acerca de la exacta distribución de una enfermedad en los cultivos (Valbuena-García y Rodríguez-Villamizar, 2018).

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio consistió en analizar el comportamiento espacial de la enfermedad conocida como antracnosis del aguacate en los municipios de Coatepec Harinas y Tenancingo, en el Estado de México, México, a través del empleo de la geoestadística y el Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en el Estado de México, propiamente en los municipios de, Coatepec Harinas (18°54'00"N 99°43'00"O) y Tenancingo (18°57'38"N 99°34'32"O) durante los meses de julio de 2019 a junio de 2020; estos municipios fueron seleccionados debido a que son productores de aguacate en la entidad y porque cuentan con grandes superficies sembradas con este cultivo, por su parte, Coatepec Harinas alberga un total de 2,155 ha, mientras que Tenancingo cuenta con un total de 884 ha sembradas con aguacate (Figueroa-Figueroa, Dávila, Antonio-Némiga y Huerta (2020).

Trabajo de campo

Distribuidos hacia los cuatro puntos cardinales de cada municipio, se seleccionaron, georreferenciaron, a través de un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS), 400 árboles de aguacate cultivar Hass para medir la incidencia de antracnosis en los frutos, tomando en cuenta síntomas como manchas necróticas de tonos marrones, hundidas y con masas de esporas de color rosado. Cada árbol fue dividido en tres estratos, alto, medio y bajo, considerando cuatro ramas en cada estrato distribuidas nuevamente hacia los cuatro puntos cardinales; de cada rama se observaron cuatro frutos, teniendo un total de 48 frutos por árbol para análisis de incidencia, haciendo uso de la escala propuesta por Morales et al. (2009).

Análisis geoestadístico

Para el procesamiento geoestadístico de los datos obtenidos en cada muestreo se utilizó el software Variowin 2.0 (Software para el análisis de datos espaciales en 2D. Primavera Verlag, New York; EEUU), a través de éste se estimaron semivariogramas experimentales, mismos que fueron ajustados a modelos teóricos, los cuales comúnmente suelen ser esféricos, gaussianos y exponenciales. Así mismo, se determinaron los parámetros de meseta, rango y efecto pepita, mismos que se van modificando hasta obtener estadísticos de validación cruzada idóneos para aprobar matemáticamente los modelos ajustados. Los indicadores fueron los siguientes:

- Media de los errores: este valor no debe ser significativamente distinto de 0 (Prueba de t), en cuyo caso, indicaría que el modelo de semivariograma permite un cálculo de estimación no sesgada.
- Error cuadrático medio (ECM): un modelo de semivariograma se considera adecuado si el valor del estadístico es cercano a cero.
- Error cuadrático medio adimensional (ECMA): la validez del modelo se satisface si ECMA está comprendido entre los valores $1 \pm 2 (2/N) 0,5$.

Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE)

El Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE), es una metodología complementaria que se empleó en este trabajo para determinar el modelo de distribución espacial de la antracnosis, y se basa principalmente en determinar la distancia para la regularidad (índice Ia), así como la distancia del agrupamiento (índice Ja).

La estimación de los índices Ia y Ja se desarrolló con los datos recolectados en una cuadrícula prediseñada, los cuales se asumen como un sistema de conteo de individuos, donde $i=1, \dots, n$ unidades de muestreo. Se asume además por ser conocida la posición bidimensional (x, y) de cada unidad de muestreo y su conteo asociado, Ni.

La distancia para la regularidad, D, representa el valor mínimo de la distancia total que los individuos en la muestra se pudieron desplazar de una unidad de muestreo a otra, de modo que todas las unidades de muestreo contuvieran un número idéntico de individuos (Sánchez-Pale, Ramírez-Dávila, González-Huerta y de León, 2015).

En la metodología de SADIE se asume que una muestra será agregada si $Ia > 1$, en cambio, la

muestra es espacialmente aleatoria si $I_a = 1$, y finalmente, una muestra regular si $I_a < 1$. El término C denota la distancia para el agrupamiento, que es el valor mínimo de la distancia total que los individuos de la muestra deben moverse para congregarse en una unidad (Sánchez-Pale et al., 2015).

Permutaciones aleatorias de los conteos observados conducen a una proporción denominada Q_a (probabilidad de agrupamiento), con una distancia para el agrupamiento tan pequeña, o más pequeña que el valor observado, C . Como en el caso del índice I_a , valores de $J_a > 1$ usualmente indican una muestra agregada, $J_a = 1$ representan datos espacialmente aleatorios, y $J_a < 1$ muestras regulares (Perry y Klukowsky, 1997).

Nivel de dependencia espacial

La determinación del nivel de dependencia espacial se obtuvo al dividir el efecto pepita entre la meseta, cuyo resultado es expresado en porcentaje. Si el resultado es menor de 25% el nivel de dependencia espacial se considera alto, si se encuentra entre 26 y 75% el nivel de dependencia espacial es moderado y si es mayor del 76% el nivel de dependencia es bajo (Rivera Martínez, Ramírez Dávila, Martínez Quiroz y González Huerta, 2020).

Mapeo por kriging y Superficie infectada

Después del ajuste de los semivariogramas, se llevó a cabo la interpolación de datos mediante kriging ordinario para permitir la visualización de los patrones de distribución espacial de la enfermedad a lo largo del tiempo; las estimaciones derivadas se representaron en forma de mapas para cada muestreo de árboles enfermos mediante el uso del programa Surfer 16 (Surface Mapping System Golden Software Inc. 809, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para brindar una mayor claridad de los resultados obtenidos con cada uno de los métodos, se presentan de manera separada y a continuación se detallan con precisión:

Análisis geoestadístico

En este trabajo se realizaron un total de 48 muestreos en los municipios de Tenancingo y Coatepec Harinas, en el Estado de México, por lo tanto, se obtuvieron 48 mapas de incidencia y 48 semivariogramas ajustados a modelos teóricos. Los modelos y parámetros de los semivariogramas ajustados para cada zona experimental donde se muestreó antracnosis se detallan en la Tablas 1.

Para el municipio de Coatepec Harinas, los modelos del semivariograma fueron en su mayoría de tipo gaussiano y exponencial, presentándose modelos esféricos solo en los muestreos de julio, agosto, septiembre, enero y marzo.

De igual manera, en el municipio de Tenancingo se presentó una tendencia de la enfermedad representada a través de modelos de tipo gaussiano nuevamente, aunque no se descartó el ajuste a modelos de tipo exponencial, por lo que se atribuye que un comportamiento esférico no es frecuente para ésta enfermedad dentro de las zonas de muestreo. El ajuste al modelo gaussiano indica que el comportamiento de agregación de la antracnosis

se expresa de forma continua dentro de la zona estudiada (Rivera et al. 2020).

Por otro lado, los valores de rango fluctuaron entre 1,02 como mínimo y 56,7 como máximo para Coatepec Harinas, este último valor asociado a un modelo gaussiano; mientras que, 12 como mínimo y 41 como máximo fueron los valores de rango para Tenancingo. Esta distancia señala hasta donde existía dependencia espacial de los datos muestreados, más allá del valor máximo de la distancia, la dependencia espacial era nula.

Resulta importante señalar que la distancia máxima encontrada de 56,7 es considerable, debido al tamaño del área de estudio. Lo anterior establece entonces que, presentar rangos mayores indica una mayor aplicación del modelo establecido; por lo tanto, más allá del valor en distancia del rango obtenido, la dependencia espacial es nula (Zamora, Dávila, Arriaga, Némiga y Díaz, 2016).

Los valores de meseta, más bajos en Coatepec Harinas estuvieron asociados en su mayoría a modelos de tipo exponencial y esférico, mientras que los más altos, los presentaron modelos gaussianos y dos modelos esféricos. En el caso de Tenancingo, ocurrió que el valor más alto para este parámetro se asocia más a modelos exponenciales, los cuales presentaron los valores más altos.

En la misma Tabla 1 se observa que en lo que concierne al efecto pepita, para todas las fechas de muestreo fue de cero, lo que indica que la escala de muestreo fue la apropiada para el monitoreo de la antracnosis, coincidiendo ampliamente con lo que mencionan Oliver y Webster (1998) quienes sugieren que una pepita de cero no solo demuestra que el error de muestreo fue mínimo, también indica que los modelos ajustados tienen un 98% de confiabilidad.

Análisis Espacial por Índices de Distancia

Por otro lado, el Análisis Espacial por Índices de Distancia muestra que I_a fue mayor para todos los muestreos en Coatepec Harinas, siendo 1,66 el valor mayor asociado al segundo muestreo del mes de agosto (Tabla 2).

Para Tenancingo, el mayor valor fue de 1,65 asociado al primer muestreo de abril (Tabla 2). Con esto, se indica que existe agregación de la antracnosis en las zonas de muestreo. Los valores asociados al índice J_a confirman ésta agregación detectada por el índice I_a , ya que indica también la cantidad de centros de agregación en las superficies de muestreo de la antracnosis. Rivera et al. (2018) mencionan que cuando se obtienen los valores que no son significativamente diferentes a la unidad, los resultados de las poblaciones de la variable se distribuyen en la zona de muestreo en más de un centro de agregación. Se puede observar que en todos los casos el índice I_a fue significativamente mayor a 1, lo que nos indica una agregación. El índice J_a en todas las zonas donde se muestreó antracnosis no fue significativamente mayor a 1, lo que nos indica que hay más de un foco de agregación.

Tabla 1. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de incidencia de antracnosis en el cultivo de aguacate en Coatepec Harinas y Tenancingo.

COATEPEC HARINAS								
MUESTREO	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP.
AGO 1	10,89	53,80	EXPO	0	30,45	35,1	0	ALTA
AGOSTO 2	12,36	61,88	ESERICO	0	59,94	43,2	0	ALTA
SEPT 1	12,89	66,42	ESFER	0	3,29	45,9	0	ALTA
SEPT2	9,89	36,95	EXPO	0	54,27	56,7	0	ALTA
OCTUBRE 1	11,05	55,59	EXPO	0	1,67	23	0	ALTA
OCTUBRE 2	10,70	45,65	EXPO	0	2,82	43,2	0	ALTA
NOV1	3,81	9,69	EXPO	0	1,02	27	0	ALTA
NOV 2	10,73	36,77	EXPO	0	3,01	37,8	0	ALTA
DIC1	10,60	31,71	GAUSS	0	2,13	29,9	0	ALTA
DIC2	9,97	34,75	GAUSS	0	3,39	35,1	0	ALTA
ENERO 1	1,50	2,27	ESFER	0	48,18	40,5	0	ALTA
ENERO 2	1,68	1,41	GAUSS	0	34,78	45,9	0	ALTA
FEBRERO 1	2,50	2,04	GAUSS	0	6,79	45,9	0	ALTA
FEBRERO 2	2,08	4,00	GAUSS	0	34,76	29,7	0	ALTA
MARZO 1	1,61	1,13	GAUSS	0	2,068	22,4	0	ALTA
MARZO 2	2,80	2,14	ESFER	0	1,14	52,2	0	ALTA
ABRIL 1	2,77	2,21	GAUSS	0	59,11	41,4	0	ALTA
ABRIL 2	4,73	21,09	GAUSS	0	55,44	43,2	0	ALTA
MAYO 2	3,93	3,49	GAUSS	0	64,02	43,7	0	ALTA
MAYO 2	6,68	31,00	EXPO	0	35,22	23	0	ALTA
JUNIO 1	9,42	43,54	GAUSS	0	2,139	32,2	0	ALTA
JUNIO 2	12,85	80,73	GAUSS	0	48,06	39,1	0	ALTA
JULIO 1	12,53	65,72	ESFER	0	44,02	34,5	0	ALTA
JULIO 2	12,52	65,72	EXPO	0	29,12	27	0	ALTA
TENANCINGO								
MUESTREO	MEDIA	VARIANZA	MODELO	PEPITA	MESETA	RANGO	PEP/MES	DEP. ESP
AGOSTO 1	19,86	119,15	GAUSS	0	98,4	26,4	0	ALTA
AGOSTO 2	20,29	116,16	GAUSS	0	100,8	18	0	ALTA
SEPT 1	22,39	154,47	ESFER	0	173	37,79	0	ALTA
SEPT 2	22,25	180,62	EXPO	0	171	32,4	0	ALTA
OCTUBRE 1	20,10	136,36	GAUSS	0	131,6	20	0	ALTA
OCTUBRE 2	18,85	109,73	EXPO	0	106,7	24	0	ALTA
NOV 1	14,43	80,93	EXPO	0	72,9	14	0	ALTA
NOV 2	14,19	59,04	EXPO	0	54	18	0	ALTA
DIC 1	10,11	36,32	GAUSS	0	53,4	16	0	ALTA
DIC 2	8,89	31,05	EXPO	0	109,2	39,6	0	ALTA
ENERO 1	2,23	1,88	ESFER	0	1,76	35,99	0	ALTA
ENERO 2	1,82	1,49	GAUSS	0	1,455	33,6	0	ALTA
FEBRERO 1	2,56	1,92	EXPO	0	1,78	28,8	0	ALTA
FEBRERO 2	2,22	1,61	EXPO	0	1,41	28,8	0	ALTA
MARZO 1	2,97	3,55	GAUSS	0	3,24	41,4	0	ALTA
MARZO 2	3,02	2,36	GAUSS	0	1,23	32,4	0	ALTA
ABRIL 1	2,81	2,06	ESFER	0	1,32	39,6	0	ALTA
ABRIL 2	2,86	3,63	GAUSS	0	1,2	32	0	ALTA
MAYO	3,42	1,54	EXPO	0	1,2	37,8	0	ALTA
MAYO 1	5,85	28,40	EXPO	0	23,78	30,6	0	ALTA
JUNIO 1	13,34	69,68	EXPO	0	63,7	34,2	0	ALTA
JUNIO 2	15,52	85,96	GAUSS	0	63,7	32,4	0	ALTA
JULIO 1	15,31	96,45	EXPO	0	85,56	12	0	ALTA
JULIO 2	17,84	91,74	GAUSS	0	86,48	16	0	ALTA

Tabla 2. Valor de los índices Ia y Ja y sus respectivas probabilidades Pa y Qa en la incidencia de antracnosis en el cultivo de aguacate.

COATEPEC HARINAS					
MES	MUESTREO	Ia	Pa	Ja	Qa
JULIO	1	1,39	0,009s	1,16	0,266
	2	1,48	0,016s	1,11	0,150
AGOSTO	1	1,29	0,011s	1,06	0,158
	2	1,66	0,012s	1,26	0,252
SEPTIEMBRE	1	1,43	0,006s	1,18	0,166
	2	1,37	0,012s	1,15	0,144
OCTUBRE	1	1,51	0,010s	1,13	0,184
	2	1,47	0,013s	1,22	0,550
NOVIEMBRE	1	1,40	0,008s	1,07	0,206
	2	1,57	0,011s	1,25	0,142
DICIEMBRE	1	1,30	0,015s	1,20	0,219
	2	1,60	0,007s	1,17	0,178
ENERO	1	1,34	0,007s	1,14	0,197
	2	1,63	0,016s	1,24	0,153
FEBRERO	1	1,49	0,015s	1,09	0,241
	2	1,52	0,013s	1,11	0,222
MARZO	1	1,62	0,011s	1,21	0,213
	2	1,28	0,014s	1,10	0,160
ABRIL	1	1,46	0,011s	1,14	0,252
	2	1,41	0,012s	1,12	0,173
MAYO	1	1,54	0,014s	1,15	0,149
	2	1,32	0,010s	1,19	0,247
JUNIO	1	1,58	0,014s	1,23	0,235
	2	1,44	0,011s	1,08	0,192
TENANCINGO					
MES	MUESTREO	Ia	Pa	Ja	Qa
JULIO	1	1,46	0,010s	1,17	0,256ns
	2	1,56	0,013s	1,10	0,167ns
AGOSTO	1	1,44	0,015s	1,25	0,159ns
	2	1,52	0,010s	1,11	0,135ns
SEPTIEMBRE	1	1,30	0,017s	1,19	0,215ns
	2	1,37	0,014s	1,16	0,144ns
OCTUBRE	1	1,60	0,006s	1,06	0,201ns
	2	1,49	0,007s	1,21	0,154ns
NOVIEMBRE	1	1,50	0,011s	1,13	0,235ns
	2	1,39	0,013s	1,15	0,170ns
DICIEMBRE	1	1,41	0,010s	1,18	0,189ns
	2	1,38	0,014s	1,09	0,149ns
ENERO	1	1,63	0,012s	1,11	0,241ns
	2	1,35	0,011s	1,12	0,162ns
FEBRERO	1	1,40	0,009s	1,20	0,183ns
	2	1,51	0,010s	1,13	0,222ns
MARZO	1	1,49	0,011s	1,15	0,239ns
	2	1,62	0,016	1,20	0,151ns
ABRIL	1	1,65	0,008s	1,07	0,228ns
	2	1,58	0,007s	1,14	0,195ns
MAYO	1	1,54	0,012s	1,08	0,173ns
	2	1,42	0,013s	1,14	0,244ns
JUNIO	1	1,31	0,008s	1,23	0,166ns
	2	1,64	0,010s	1,08	0,248ns
JULIO	1	1,46	0,010s	1,17	0,256ns
	2	1,56	0,013s	1,10	0,167ns

Donde: s, significativo; ns, no significativo

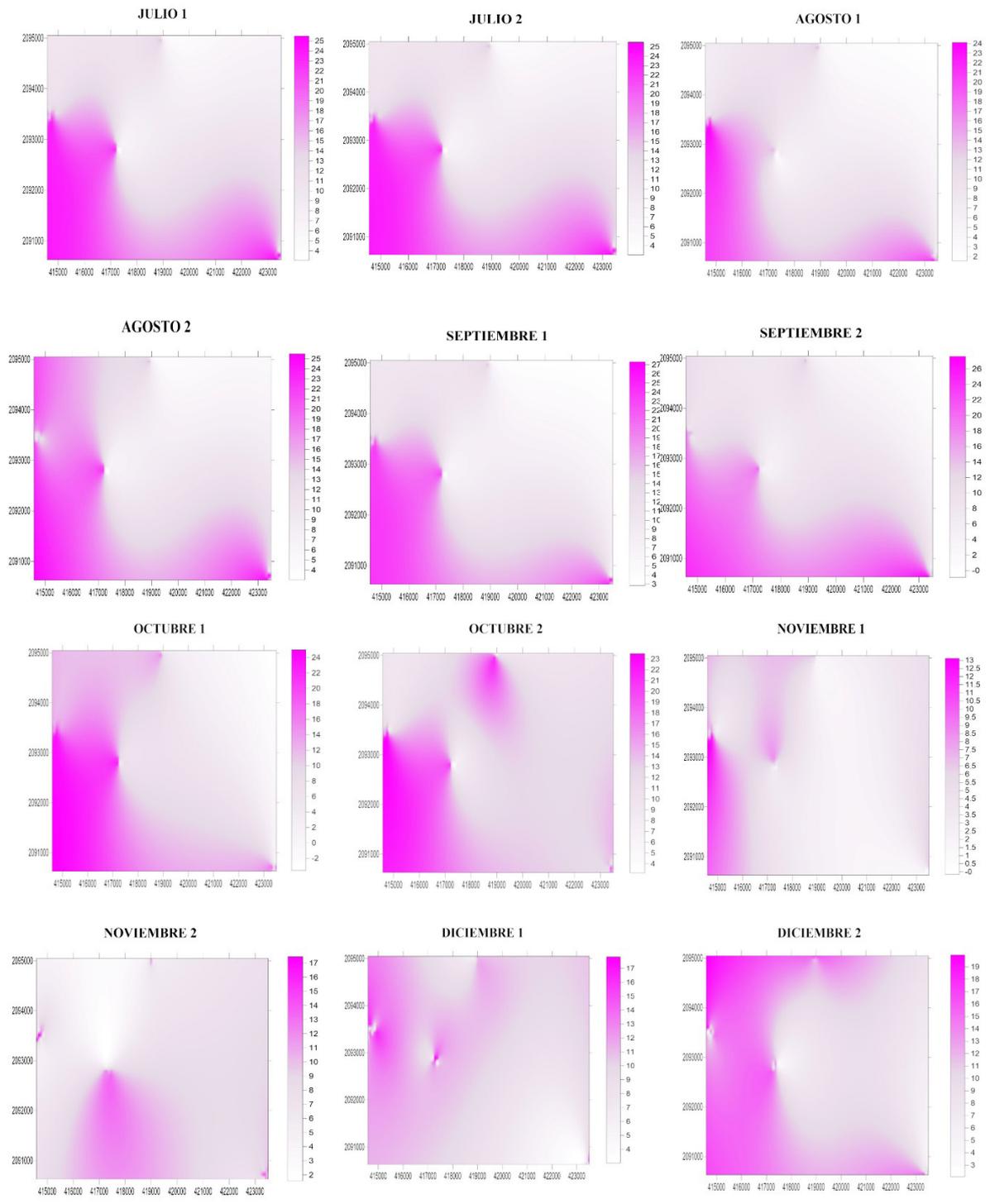


Figura 1A. Mapas de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate en Coatepec Harinas en el Estado de México, México de julio a diciembre de 2019.

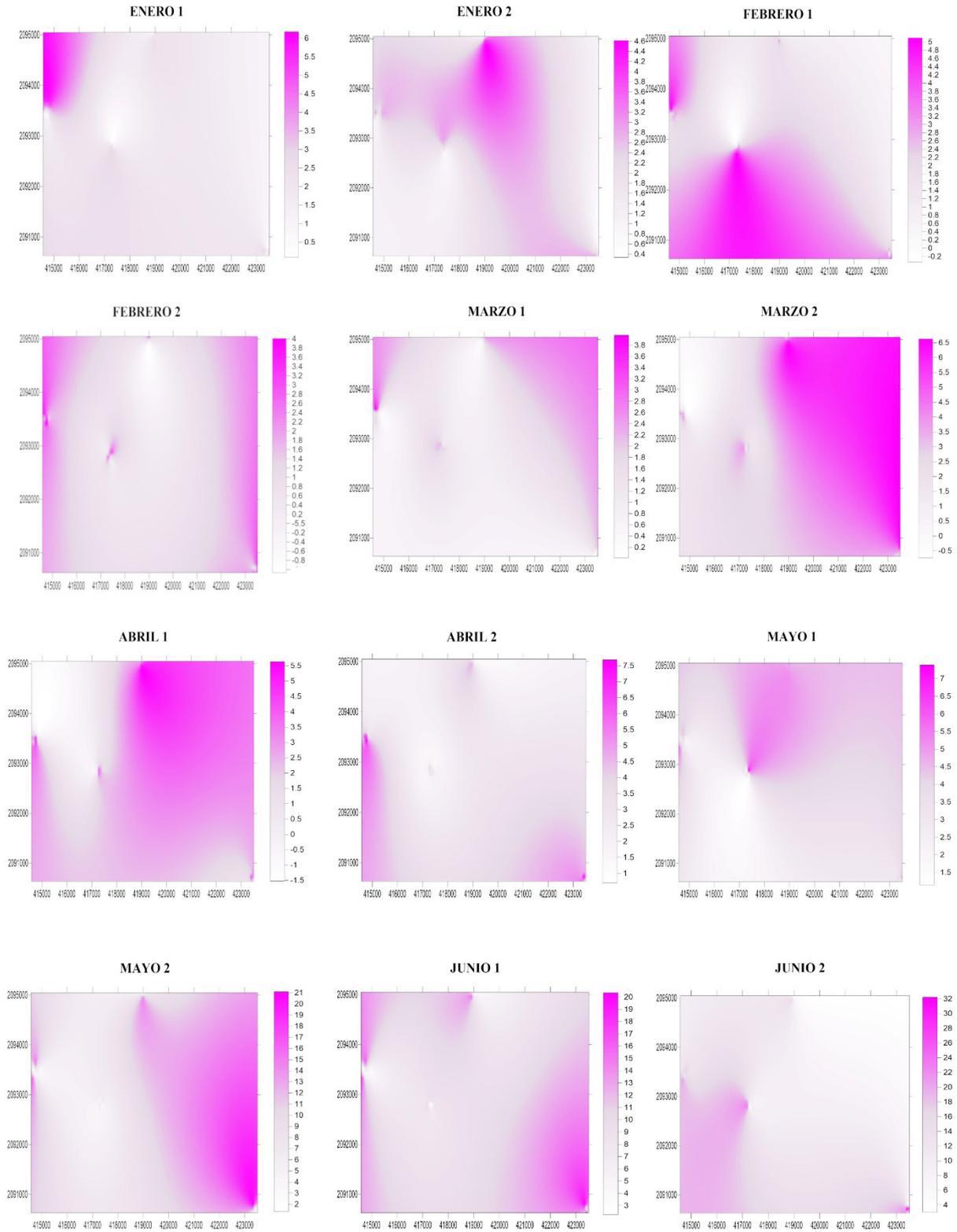


Figura 1B. Mapas de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate en Coatepec Harinas en el Estado de México, México de enero a junio de 2020.

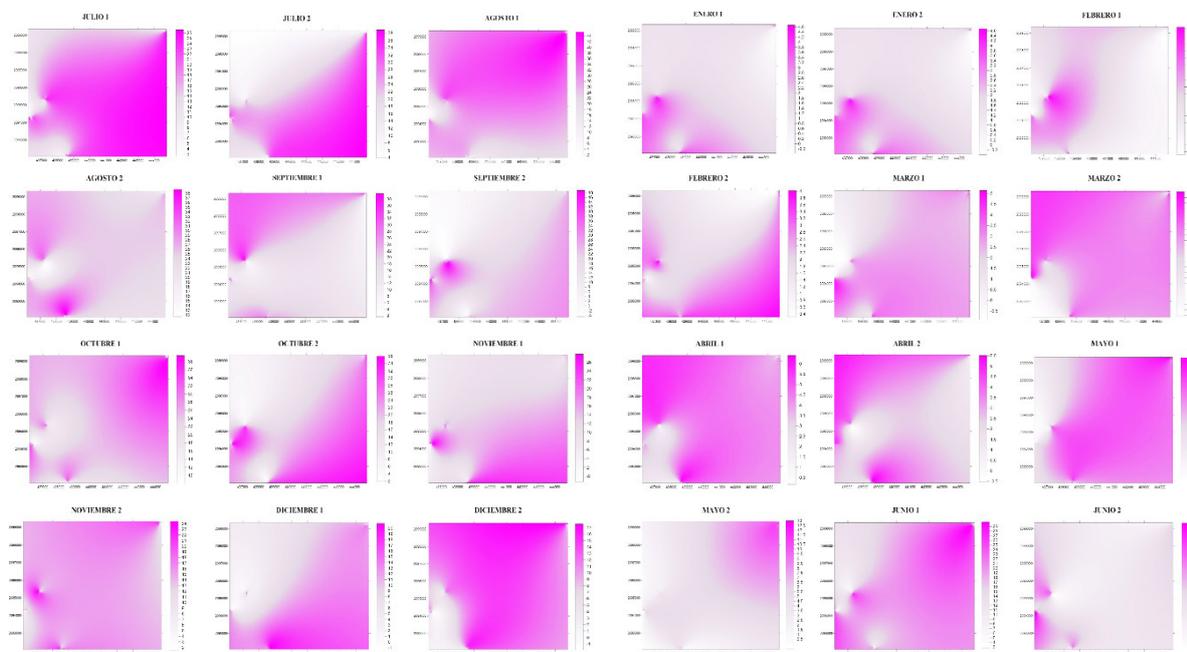


Figura 2. Mapas de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate en Tenancingo, Estado de México, México.

Mapeo y superficie infectada

Se realizaron mapas para determinar la superficie infectada con antracnosis, basándonos en las estimaciones realizadas con la técnica del krigeado ordinario. Los mapas elaborados se detallan en las Figuras 1 y 2 respectivamente. La distribución agregada de la antracnosis en las parcelas de aguacate queda de manifiesto en cada uno de ellos.

En los mapas (Figuras 1 A, B y 2) realizados, se alcanzan a apreciar los diferentes focos de agregación o de agrupamiento de la antracnosis en las dos zonas de estudio (Coatepec Harinas y Tenancingo). Se logra incluso distinguir de forma general, cierta relación entre el número de centros de agregación y el promedio de frutos enfermos detectados en cada caso. Es decir, mayor cantidad de centros de agregación relacionados con mayor densidad de la enfermedad. En todos los casos, los centros de agregación de la antracnosis se hallaron repartidos más o menos en toda la superficie de las zonas de estudio. Estos mapas reflejan lo obtenido con el análisis de SADIE, indicando la presencia de más de un centro de agregación. Por otro lado, resultó interesante conocer si la infección de la enfermedad era general en las dos zonas, por lo tanto, se determinó el porcentaje de superficie infectada para cada uno de los municipios.

De manera general, se observó en los mapas que la superficie libre de infección disminuyó conforme la densidad de la antracnosis era mayor. De esta manera se detectó que, durante los muestreos en los meses de octubre, noviembre, parte de diciembre y febrero en Tenancingo el porcentaje de superficie infectada fue mayor, mientras que, durante el primer muestreo de agosto, el segundo muestreo de septiembre y el primero de octubre, la superficie

infectada fue menor (Tabla 3).

Estos datos coinciden con lo observado en campo, ya que, durante las fechas de muestreo, los porcentajes de humedad relativa oscilaron por arriba del 80%, y el último sexenio del año 2019 no fue tan lluvioso en comparación con otros años, donde el volumen de precipitación y el porcentaje de humedad suele ser mayor.

En el caso de Coatepec Harinas, en la Tabla 3 se muestra que los porcentajes más altos (por arriba del 90%) de superficie infectada con antracnosis se presentaron durante la mayoría de las fechas de muestreo, a excepción de los muestreos de agosto, el primer muestreo de septiembre, el segundo muestreo de marzo, el primero de abril y el primer muestreo de mayo; es importante mencionar que Coatepec Harinas es uno de los municipios con mayor producción de aguacate en el Estado de México, por lo que en los muestreos anteriormente mencionados, se presentaron condiciones de cosecha de frutos, limpieza de las huertas y otras actividades relacionadas al manejo del cultivo en sí, factores que propiciaron esta baja en el porcentaje de infección encontrado en los mapas.

Pese a que la antracnosis se encontraba en condiciones óptimas para su desarrollo, el porcentaje de infección alcanzado en todos los muestreos para ambas zonas de estudio, jamás llegó al 100%. Esto puede explicarse debido a factores anteriormente mencionados como las condiciones edafoclimáticas, la cosecha de los frutos, las medidas de control aplicadas en las zonas de estudio sobretodo en la temporada de floración en otoño y al inicio de la primavera. Ante esto, Reina-Noreña, Mayorga-Cobos, Caldas-Herrera, Rodríguez-Valenzuela y Varón-Devia (2015) señalan que la disminución del rendimiento,

Tabla 3. Porcentajes de superficie infectada con antracnosis en el cultivo de aguacate.

COATEPEC HARINAS			TENANCINGO		
MUESTREO	SUPERFICIE INFECTADA %	SUPERFICIE NO INFECTADA %	MUESTREO	SUPERFICIE INFECTADA %	SUPERFICIE NO INFECTADA %
JULIO 1	97	3	JULIO 1	93	7
JULIO 2	99	9	JULIO 2	92	8
AGOSTO 1	81	19	AGOSTO 1	86	14
AGOSTO 2	89	11	AGOSTO 2	92	8
SEP 1	83	17	SEP 1	94	6
SEPT 2	91	9	SEPT 2	88	12
OCT 1	90	10	OCT 1	89	11
OCT 2	97	3	OCT 2	97	3
NOV 1	98	2	NOV 1	98	2
NOV 2	90	10	NOV 2	91	9
DIC 1	95	5	DIC 1	93	7
DIC 2	97	3	DIC 2	97	3
ENERO 1	96	4	ENERO 1	93	7
ENERO 2	97	3	ENERO 2	92	8
FEB 1	91	9	FEB 1	91	9
FEB 2	90	10	FEB 2	96	4
MARZO 1	90	10	MARZO 1	92	8
MARZO 2	88	12	MARZO 2	91	9
ABRIL 1	86	14	ABRIL 1	90	10
ABRIL 2	99	1	ABRIL 2	88	12
MAYO 1	88	12	MAYO 1	85	15
MAYO 2	96	4	MAYO 2	91	9
JUNIO 1	95	5	JUNIO 1	93	7
JUNIO 2	97	3	JUNIO 2	82	18

debido al incremento de la incidencia y severidad de enfermedades causadas por hongos y a la proliferación de focos de infección, puede ocurrir debido a olas invernales, generando un crecimiento especial de la precipitación y aumentar considerablemente la humedad en el suelo en las áreas de producción de aguacate.

Este estudio propone que con ayuda de la estadística espacial, es posible dirigir el control fitosanitario de manera eficaz, ya que resulta importante enfatizar que al detectar áreas libres de infección, las medidas de control que se pudiesen tomar para detener el avance de las enfermedades como la antracnosis, no implicarían un control general de las zonas afectadas, sino que las que ya están establecidas, se aplicarían únicamente en las áreas realmente dañadas, es decir, el control sería dirigido, lo cual evitaría un gasto innecesario en productos químicos para el productor y por lo tanto, favorecería un ahorro económico y la disminución del impacto ambiental.

El manejo fitosanitario que el productor quiera darle a su cultivo, dependerá en gran medida de él, sin embargo, se sugiere como alternativa de control las podas fitosanitarias, el retiro de hojas y ramas que representan la fuente del inóculo, la aplicación en dosis adecuadas de fungicidas a base de cobre, entre otras.

El conocimiento del comportamiento y distribución espacial de las enfermedades en los cultivos agrícolas

constituye un área que requiere ser explorada, de tal manera, que las investigaciones favorezcan no solo a la comunidad científica, sino principalmente, a los productores de aguacate del Estado de México.

CONCLUSIONES

La geoestadística y el análisis espacial por índices de distancia demostraron ser métodos eficaces y precisos para determinar el comportamiento espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate en los municipios de Coatepec Harinas y Tenancingo, en el Estado de México. La distribución espacial de la antracnosis en el cultivo de aguacate se ajustó principalmente a modelos de tipo gaussiano y exponencial en la mayoría de los muestreos realizados. Los mapas de superficie infectada muestran la presencia de centros de agregación que se mantuvieron a lo largo de todo el periodo de muestreo en las zonas de estudio. El porcentaje de infección por antracnosis no alcanzó el 100%, aunque si se presentaron porcentajes por arriba del 90%. Los valores de los índices I_a y J_a confirmaron la distribución agregada y la presencia de más de un foco de infección.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para realizar los estudios de posgrado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro Espino, E., Morales García, J. L. & Pedraza-Santos, M. E. (2017). Hongos asociados al síndrome de la roña del aguacate en el estado de Michoacán, México. En *Memorias del IV Congreso Latinoamericano del Aguacate*, 04-07 de setiembre 2017, pp. 1-9. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Figueroa-Figueroa, D. K., Dávila, J. F. R., Antonio-Némiga, X. & Huerta, A. G. (2020). Cartografía del aguacate en el sur del estado de México mediante tratamiento digital de imágenes sentinel-2. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 865-879.
- FAO. (2020). *Análisis del mercado de las principales frutas tropicales*. Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Lemus-Soriano, B. A. & Pérez-Aguilar, D. A. (2017). Manejo de la antracnosis del aguacate con biofungicidas. En *Memorias del IV Congreso Latinoamericano del Aguacate*, 04-07 de setiembre 2017, pp. 1-5. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Martínez-Martínez, N., Ramírez-Dávila, J. F., Lara-Vázquez, F. & Figueroa-Figueroa, D. K. (2021). Spatial distribution of dwarf mistletoe in Monarch Butterfly Biosphere Reserve. *Colombia Forestal*, 24(2), 65-81.
- Morales-García, J. L. (1996). *Caracterización cultural, morfológica, patogénica y molecular de Colletotrichum gloeosporioides Penz. Causante de la antracnosis del aguacate en Michoacán*. (Tesis de Maestría). Montecillo, Estado de México, México : Colegio de Postgraduados, 96 p.
- Morales G. J. L., Guzmán, M. D. P. R., Rivero, H. S. A. & Santos, M. E. P. (2009). Modelo para la estimación del área del fruto en la evaluación de la antracnosis en aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. Hass. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(2), 421-424.
- Oliver, M. & Webster, R. (1998). How geostatistics can help you. *Soil Use Manag.*, 7, 206-217.
- Perry, N. & Klukowsky, Z. (1997). Spatial distributions of counts at the edges of sample areas. En *VI Conferencia de la Sociedad de Biometría*. Córdoba, España.
- Reina-Noreña J., Mayorga-Cobos M. J., Caldas-Herrera S. J., Rodríguez-Valenzuela J. & Varón-Devia E. H. (2015). El problema de la peca en cultivos de aguacate (*Persea americana* Mill.) del norte del Tolima, Colombia. *Corpoica Cienc Technol Agropecu.*, 16(2), 265-278
- Rivera Martínez, R., Ramírez Dávila, J. F. & Acosta Guadarrama, A. (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, 24-33. 10.15174/au.2018.1944.
- Rivera Martínez, R., Ramírez Dávila, J. F., Martínez Quiroz, M. & González Huerta, A. (2020). Spatial modeling of *Bactericera cockerelli* Sulc. nymphs on husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) using of geostatistical techniques. *Biotecnia*, 22 (1), 142-152. Disponible en: <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i1.1162>
- Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809.* (2002). 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA.
- Sánchez-Pale, J. R., Ramírez-Dávila, J. F., González-Huerta, A. & de León, C. (2015). Patrón espacial del carbón de la espiga del maíz en diferentes localidades del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (7), 1467-1480.
- Trinidad Ángel, E., Ascencio Valle, F., Ulloa, J., Ramírez Ramírez, J., Ragazzo Sánchez, J., Calderón Santoyo, M. & Bautista Rosales, P. (2017). Identificación y caracterización de *Colletotrichum* spp. causante de antracnosis en aguacate de Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (19), 3953-64.
- Valbuena-García, A. M. & Rodríguez-Villamizar, L. A. (2018). Análisis espacial en epidemiología: revisión de métodos. *Rev Uni Ind Santander Salud*, 50 (4), 358-365. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18273/revsal.v50n4-2018009>
- Vivas, L. E. & Notz, A. (2011). Distribución espacial en poblaciones de *Oebalus insularis* Stal (Hemiptera: Pentatomidae) en el cultivo de arroz en Calabozo, estado Guárico, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 11 (1), 109-125.
- Zamora, F. I. M., Dávila, J. F. R., Arriaga, M. R., Némiga, X. A. & Díaz, A. V. L. (2016). Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7, 845-856.