

Comportamiento de las poblaciones de roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley y *Broome*) en parcelas de Amatepec, Estado de México

Aurelio Pérez Constantino¹
José Francisco Ramírez Dávila²
Delfina de Jesús Pérez López³
Dulce Karen Figueroa Figueroa⁴

Introducción

El Estado de México cuenta con aproximadamente 549.06 ha sembradas de café de las cuales se obtiene una producción de 622.29 toneladas, distribuidos en ocho municipios de la entidad, en donde está presente la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*), estos municipios son catalogados como “Zonas bajo control fitosanitario” por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SIAP, 2020).

Antecedentes

La roya del cafeto es uno de los problemas fitosanitarios más comunes en el cultivo del café (APS, 2011), es causada por el por el hongo *Hemileia vastatrix*, fue encontrada por primera vez en México en 1981 en la región cafetalera del municipio de Tapachula, Chiapas, en esta época no reporto daños considerables a la producción, el clima era más estable y

¹ Estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; de la Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEM. Centro Universitario el Cerrillo Piedras Blancas Km. 15 Carr. Toluca-Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo. C.P. 50200 Toluca, Méx. Tel. (01 729) 296 55 31 Ext: 139 Ce: aperezc023@alumno.uaemex.mx.

² Profesor-Investigador responsable del laboratorio de Entomología de la Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEM. Centro Universitario el Cerrillo Piedras Blancas Km. 15 Carr. Toluca-Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo. C.P. 50200 Toluca, Méx. Tel. (01 729) 296 55 31 Ext: 139 Ce: jfrd@uaemex.mx.

³ Profesor Investigador de la Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEM. Centro Universitario el Cerrillo Piedras Blancas Km. 15 Carr. Toluca-Ixtlahuaca Entronque al Cerrillo. C.P. 50200 Toluca, Méx. Tel. (01 729) 296 55 31 Ext: 139.

⁴ Profesora de la Universidad Mexiquense del Bicentenario, UES Coatepec Harinas, Estado de México, dulce.figueroa@umb.mx

varios años atrás se hicieron campañas de prevención, se mantuvo en buen estado las plantaciones y el rendimiento y la Roya no tuvo los efectos negativos que se pronosticaban (Castillo, 2013). Pero para el periodo comprendido entre el año 2010-2012, se comenzaron a detectar y reportar brotes atípicos de *Hemileia vastatrix* en algunos países de Centroamérica, principalmente en Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Entre otros. Según Cristancho *et al.* (2012) los incrementos en la incidencia de la enfermedad ocasionaron pérdidas de hasta un 30% en el rendimiento.

Para el 2012 las condiciones de los cafetales en México eran diferentes y poco favorables en comparación con 1981, había un mal manejo de los cafetales y abandono total o parcial de las huertas todo como consecuencia del descenso en los precios causado por el exceso de oferta de café en el mercado mundial que, según Aguilar (2013) fue una caída permanente, con ligeras recuperaciones, desde abril de 1997 hasta el 2002. Lo anterior sumado al poco apoyo de los gobiernos causo del 2004 al 2016 provocó una disminución en superficie sembrada y producción de café (SIAP, 2020) evidenciando una notable desarticulación de todo el Sistema Productivo Café en México (SENASICA, 2018). En este año hubo aumento en la incidencia de la roya, principalmente en la región del Soconusco y Chiapas como consecuencia del cambio climático causado por el fenómeno del niño, a la llegada de la enfermedad el hongo encontró huertas avejentadas, poco manejo agronómico y poca inversión gubernamental, lo anterior genero la necesidad de generar y desarrollar información en temas de producción y fitosanidad en el sector cafetalero.

En este mismo año el SENASICA, ANACAFE y diversos sectores de investigación, realizaron un diagnóstico para conocer de la condición regional epidémica de la roya en el estado de Chiapas, derivado de lo anterior se pudo concluir lo siguiente: a) La situación fitosanitaria del café es similar a la que ocurre en otros países de Centroamérica y Sudamérica, b) La condición atípica es debido a condiciones climáticas (incremento acumulado de precipitación en zonas entre los 800-1,000 msnm), c) Manejo agronómico no adecuado del cultivo por parte del sector productivo (variedades, regulación de sombra, manejo de tejido, edad de las plantaciones, fertilización, control de malezas), d) ausencia de sistemas de monitoreo de enfermedades y control preventivo y d) desconocimiento de la fenología del cultivo en los últimos años (SENASICA, 2018).

Como resultado de la detección de las necesidades del sector cafetalero, a partir del 2013 el SENASICA a través de la Dirección General de

Sanidad Vegetal (DGSV) diseñó y puso en marcha en Chiapas, Guerrero y Veracruz un programa de vigilancia epidemiológica como elemento para la toma de decisiones fitosanitarias basado en el seguimiento de la epidemiología de la roya a través del tiempo permitiendo delimitar focos regionales de infección y control de roya (SENASICA, 2018).

En el año 2014 se detectó presencia la roya del cafeto en el Estado de México, las condiciones de los cafetales eran igual o peor que el resto del país: huertas en su mayoría avejentadas o con poco manejo, además de productores con poco conocimiento del cultivo que en su mayoría solo acudían a la huerta en época de cosecha. En 2016 a través del Comité de Sanidad Vegetal se incorporó en las acciones de vigilancia y control de la roya del café. Resultado de este programa de vigilancia según la Plataforma Epidemiológica de la Roya del Cafeto del SENASICA en la entidad, *Hemileia vastatrix* ha sido cambiante con tendencia a la baja, del año 2016 año con mayor severidad al 2018, pero en 2019 a la fecha las condiciones han ido a la alta debido a un aumento en severidad de roya en hoja y planta, lo que representó mayor disponibilidad de inoculo para el ciclo 2021, lo que podría resultar en un aumento en severidad y surgimiento de nuevos focos de infestación si no se realizan las actividades de control y si las condiciones regionales de la roya del cafeto se mantienen. Estas condiciones son generalizadas a nivel estado y/o municipio. Esto implica que zonas a nivel predio y planta no son representadas o difieren de las condiciones expresadas de forma regional, y que tengan una distribución espacial, incidencia y densidad mayor o menor de la roya.

Con lo mencionado, es de gran relevancia conocer distribución espacial de *Hemileia vastatrix* con el objetivo de elaborar programas de manejo integrado pertinentes y ecológicos, por lo que el desarrollo exacto y eficiente de métodos de muestreo y de valoraciones de riesgo se vuelve indispensable (Acevedo *et al*, 2016), para contar con estudios de distribución espacial y densidad más específicos que permitan obtener información precisa que ayude a realizar acciones de control y manejo de la roya más localizados, de tal manera que se puedan dirigir no solo las acciones de control químico sino también, las acciones de manejo cultural y preventivo durante el tiempo y el espacio del cultivo. Los métodos de la estadística espacial son una opción para conocer y determinar las zonas con grados de infestación que requieran un control inmediato, ya que los estudios geoestadísticos tienen en cuenta la naturaleza bidimensional de la distribución de los organismos a través de su localización espacial (Ramírez y Porcayo 2010), así también de-

tectar posibles preferencias en su estructura de agregación y detectar zonas que no presenten infestación. Por todo lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en un municipio productor de café en el Estado de México con la metodología de la Geoestadística, bajo la hipótesis de que las poblaciones de roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) presentan una distribución en agregados y se encuentran dispersas por toda el área de estudio.

Importancia de la roya del cafeto

Impacto económico de la plaga

El cultivo de café es de gran importancia como producto agrícola en el comercio internacional y nacional, en el caso específico del Estado de México es una fuente generadora de empleos en toda su cadena productiva, una disminución en el rendimiento o un encarecimiento en los costos de producción por la roya significa un gran impacto en la economía de los productores y comerciantes del aromático cuyas economías dependen directo o indirectamente del café (APS, 2011).

La roya del cafeto está ampliamente distribuida en la mayoría de los países con producción de café (EPPPO, 2014). Es la enfermedad de mayor importancia económica y la más destructiva del cultivo en el mundo ya que provoca la caída temprana del follaje afectando la fotosíntesis, debilita la planta y en condiciones de infección alta llega a causar la muerte de ramas e incluso de los árboles (APS, 2011). Las variaciones en las condiciones climáticas derivado del calentamiento global, y un manejo poco adecuado del cultivo como uso de variedades susceptibles, mala nutrición, ausencia de podas y el mal manejo fitosanitario han generado un comportamiento inusual de la enfermedad tanto en estado de México como en todas las regiones cafetaleras del mundo (Cristancho *et al.*, 2012). Este comportamiento atípico del hongo se traduce en una mayor incidencia y severidad de la enfermedad que ha afectado y continúa afectando en el Estado de México a 546.06 ha de café que para el ciclo con una producción de 622.29 t con un valor de \$4, 826,680.20, una mínima reducción en estos valores representa un gran impacto para la economía local y regional (Tabla 1).

Tabla 1. Datos del cultivo de café cereza, cierre agrícola, 2020

Municipio	Superficie Sembrada (ha)	Volumen de la producción (t)	Valor de la producción (\$)	Destino de la producción
San Simón de Guerrero	19	14.03	\$109,306.50	
Temascaltepec	47.5	47.84	\$367,766.40	
Tejupilco	16.36	10.63	\$68,882.40	Europa (Lituania), Asia (Japón), Ciudad de México, Mercado local
Amatepec	338.2	393.18	\$3,597,597.00	
Tlatlaya	34	21.32	\$176,956.00	
Ocuilan	14	29.33	\$108,044.30	
Sultepec	60	72.6	\$274,428.00	
Malinalco	20	33.36	\$123,699.60	
Total	549.06	622.29	\$4,826,680.20	

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP (2020).

Ciclo biológico

La infección de la roya comienza con la aparición de síntomas en el envés de la hoja, se empiezan a observar puntos cloróticos del grosor de un alfiler estas se convierten en manchas pálidas que van aumentando en tamaño conforme avanza el tiempo hasta llegar a unirse hasta formar las manchas amarillas o naranjas con presencia de esporas en forma de polvo amarillo característico de la enfermedad (Rivillas *et al.*, 2011).

Se requieren ciertas condiciones necesarias para que las esporas germinen, estas son: seis horas con presencia de agua libre en las hojas, la temperatura ambiental tiene que estar entre los 21-25 °C y sombra. Después que las esporas de *Hemileia vastatrix* germinan, el hongo entra en las hojas las hojas a través de las estomas de las hojas maduras. Después de esto el hongo genera haustorios, que son las estructuras que extraen nutrientes de las células de la planta, en promedio treinta días después de la colonización se empiezan a generar los soros o estructuras encargadas para producir nuevas urediniósporas para generar un nuevo ciclo (Rayner, 1961).

En Estado de México, según el SENASICA basado en muestreos realizados en el ciclo de cultivo 2017, las condiciones inductivas mencionadas se generan entre el mes de mayo y el mes de noviembre, durante este periodo se presentan varios ciclos de la enfermedad que generan inoculo que con ayuda de las condiciones climáticas como la lluvia son transportados a otra planta u otra parcela formando focos de infección.

Metodología

Materiales y métodos

El presente trabajo se realizó durante el periodo comprendido entre marzo y agosto del año 2020 en el municipio de Amatepec (Localidad: Amatepec) del Estado de México, que tiene una altitud promedio de 1389 msnm, clima templado y una temperatura media de 23 °C (Cardoso, 1999).

El área de estudio fueron seis parcelas de 0.5 hectáreas, con un sistema de policultivo tradicional con una mezcla de variedades de café caturra y typica de manejo convencional, entre 40 y 60% de sombra compuesta de árboles de parota, fresnos, naranjas y limones y especie semi leñosas como la higuera, en su mayoría cafetos normales generalmente son cafetos jóvenes, menores a 15 años o bien rejuvenecidos, sin poda durante el periodo de evaluación, el tipo de suelo es clasificado como regosoles franco arenosos con 30 cm de profundidad.

Cada parcela se dividió en cuadrantes de 10mx10m para tener 50 cuadrantes, de cada uno se marcaron y georreferenciaron (DGPS) 4 árboles para un total de 200 árboles por parcela (Moral, 2004) y cada árbol se dividió en estrato bajo, medio y alto.

Se realizaron muestreos cada catorce días en 12 hojas por estrato registrado datos de incidencia de roya usando la escala de severidad e incidencia del SENASICA para detectar presencia o ausencia.

Factores climáticos

Se colocó un sensor climático dataloggers HOBO Pro V2 que registro datos de temperatura y humedad relativa en la parcela más central, con el objetivo de contribuir a explicar el comportamiento espacial del hongo *Hemileia vastatrix*, el sensor registró datos cada media hora, y se sacaron las medias, mínimas y las máximas de temperatura y humedad relativa.

Análisis de datos

Los datos de muestreo (georreferenciación y muestreo), fueron concentrados en bases de datos por fecha de muestreo para su análisis.

Estadística clásica

Con la finalidad de realizar una comparación de los resultados en el análisis de datos de muestreo de la estadística espacial con la estadística no espacial (clásica), se utilizaron los siguientes métodos generales de estadística clásica que sirven para establecer la distribución espacial de los organismos:

Las distribuciones estadísticas y los índices de dispersión. Los índices que se usaron son los Índices de Dispersión (índice de dispersión y el Índice de Green), así como las distribuciones estadísticas (Binomial Negativa y Poisson).

Análisis Geoestadístico

Análisis exploratorio de datos

Se realizó un análisis exploratorio de los datos para comprobar que cumplan con los requisitos o supuestos necesarios para utilizar la estadística espacial: Normalidad de los datos, heterogeneidad de la variable y más de 100 unidades muestréales.

La variable presento una base de heterogeneidad, se utilizaron 200 unidades muestréales por parcela y se corrobora la normalidad de los datos utilizando la prueba de Curtosis y el coeficiente de asimetría, cumpliendo así con las condiciones necesarias para trabajar con estadística espacial (Chilés y Delfiner, 1999. Fernández, 2003).

La auto correlación espacial se analizó mediante variogramas (semivariogramas). Partiendo de los datos de muestreo de roya (% de roya) más la ubicación precisa de la planta hospedera, se estimó de forma empírica el semivariograma subyacente y se calculó los parámetros del modelo del semivariograma (efecto pepita, meseta y rango) con el programa variowin 2.2, además se realizaron mapas de incidencia a partir de la técnica conocida como kriging con el programa surfer 16 (software para análisis de datos espaciales en 2D. Spring Verlag, Nueva York; USA.) y el WinGslib 2002 (Maldonado *et al.*, 2017).

Estimación del semivariograma experimental

Para cada fecha de muestreo se realizó un semivariograma experimental, se estimó sobre la base de los datos referidos a la incidencia de roya con el programan variowin 2.2.

El semivariograma experimental correspondiente a cada muestreo se realizó empleando el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Analysis in 2D. Spring Verlag, New Cork, USA) y el WinGslib 2002.

Estimación de los parámetros del modelo de Semivariograma

Una vez estimado el correspondiente semivariograma experimental se ajustaron a semivariogramas usando el software Variowin 2.0, entendiéndose como semivariogramas teóricos una expresión analítica sencilla que se emplean para representar semivariogramas reales (Gallardo, 2006). Los modelos teóricos a los que se buscó ajustar los semivariogramas experimentales fueron Modelo Esférico, Modelo Exponencial, Modelo Gaussiano, Modelo Logarítmico, Modelo Efecto Pepita Puro, Modelo Efecto Agujero, Modelo Monómico que son los más comunes según (Gallardo, 2006 y Trematerra y Sciarretta, 2002).

Modelo Esférico: Es indicativo para fenómenos para fenómenos continuos, pero no derivables, alcanza la meseta a una distancia finita. Modelo Exponencial: es representativos de fenómenos continuos, alcanza su meseta de forma asintótica. Modelo Gaussiano: alcanza su meseta asintóticamente. Se emplea para representar fenómenos continuos en todos sus puntos, pero derivables. Modelo Logarítmico: este variograma no está definido en el origen y no tiene meseta. Modelo Efecto Pepita Puro: es indicativo de un fenómeno sin ninguna autocorrelación espacial, o sea puramente aleatorio. Modelo Efecto Agujero: es utilizado para fenómenos con componentes periódicas. Modelo Monómico: estos variogramas no tienen meseta y tienden al infinito. Se utilizan para representar fenómenos no estacionarios (Gallardo, 2006 y Trematerra y Sciarretta, 2002).

Validación

Los modelos se validaron ajustando a los semivariogramas experimentales con el procedimiento denominado validación cruzada (IICA, 2014; Gallardo, 2006). Con este procedimiento no paramétrico, se eliminó un valor muestral y se empleó el método de interpolación geoestadístico

denominado krigeado, junto con el modelo de semivariograma a validar, para estimar el valor de la variable de interés en dicho punto muestral a partir de los restantes valores muestrales, este proceso se efectuó sucesivamente en todos los puntos muestrales y las diferencias entre los valores experimentales y los estimados se resumieron mediante los denominados estadísticos de validación cruzada (Media de los errores de estimación (MEE), Error cuadrático medio (ECM), Error cuadrático medio adimensional (ECMA) (Gallardo, 2006; Isaaks y Srivastava, 1989 y Hevesi *et al.*, 1992).

Nivel de dependencia espacial

Se calculó el nivel de dependencia espacial dividiendo el efecto pepita entre la meseta (valor en el cual el modelo alcanza el rango) con el fin de conocer el grado de relación entre los datos, el resultado según la fórmula se expresa en porcentaje y compara con el siguiente criterio: menor de 25% el nivel de dependencia espacial es alta, entre 26 y 75% el nivel de dependencia espacial es moderado y mayor del 76 % el nivel de dependencia es bajo (IICA, 2014; López-Granados *et al.*, 2002), es decir entre más grande sea el valor del resultado el nivel de incidencia de roya de una planta dependerá más del nivel de incidencia que conformen un foco de infección.

Elaboración de mapas

Una vez que los modelos de los semivariogramas correspondientes se validaron, con el método geoestadístico denominado Krigeado Ordinario se elaboraron los mapas de densidad de las poblaciones de la roya utilizando el programa Surfer 16 y se calculó la superficie infectada.

Ahorro económico y ambiental

Una de las metas de la agricultura de precisión es dirigir las medidas de control sobre las zonas específicas de infección de enfermedades e insectos plaga, lo cual determinaría un posible ahorro económico y una reducción de la cantidad del volumen de plaguicidas aplicados para su control. Obteniendo el porcentaje de superficie infectada de los mapas elaborados se calculó el gasto y ahorro económico y ambiental con agricultura de precisión contra agricultura convencional. El cálculo se realizó tomando en cuenta cuatro aplicaciones de ciproconazol para control

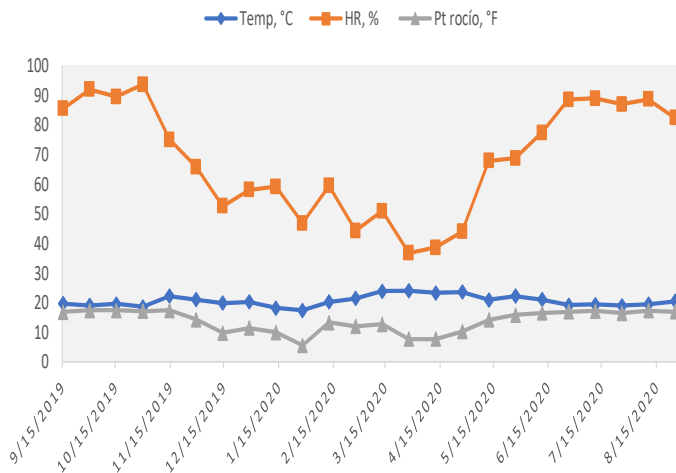
de roya a un intervalo de 30 días en las fechas que regularmente se aplica en la región.

Resultados y discusión

Factores climáticos

De acuerdo a los datos registrados en los sensores climáticos se puede decir que los meses con mayor humedad relativa del periodo de evaluación fue de mayo a agosto, que corresponden a la temporada de lluvia, por su lado, la temperatura presentó una alza en los meses correspondientes al periodo de secas (Figura 1). Esto concuerda con la Figura 2, ya que las horas favorables probablemente se presentaron en los meses de mayor humedad de junio a agosto y según la misma figura son los meses en los que no se detectó roya o esporas sobre las hojas de café debido al arrastre de estas a otras plantas para empezar un nuevo ciclo en cuanto las condiciones óptimas se presenten (Coria-Contreras *et al.*, 2014).

Figura 1. Datos climáticos de Amatepec, elaboración propia con datos recolectados con el sensor climático dattalogers HOBO Pro V2. en el periodo comprendido de marzo a agosto del 2021



Estadística clásica

Basado en las siguientes premisas: a) índice de dispersión con un valor mayor a uno es un comportamiento en agregados y con valores menores es aleatorio y, b) Índice de Green con un valor mayor a cero es una distribución agregada y los iguales a cero son aleatorios, el comportamiento de los datos con el análisis en las pruebas de estadística clásica mostró que la mayoría de los comportamientos de los índices fueron agregados en ambas pruebas (Tabla 2).

En la comparación de resultados de las diferentes pruebas de estadística clásica es notable una limitante en éstos métodos en cuanto a la precisión para detectar comportamientos de distribución espacial de roya en el cultivo del café, como sucede el caso de los resultados poisson y binomial negativa en los muestreos correspondientes a junio 2 de la parcela uno; marzo 1, agosto 1 y agosto 2 de la parcela dos; y mayo 2 y junio 1 de la parcela cuatro que se ajustaron tanto a una distribución Binomial Negativa (agregación) como a una distribución de Poisson (aleatoriedad) (Tabla 2).

De igual manera en los índices de Dispersión y Green, en marzo 2, abril 1, junio 1, julio 1, julio2 de la parcela 1; marzo 1, abril 1, junio 1, junio 2 de la parcela 2; abril 2, mayo 1, julio 1, julio2, agosto 1 de la parcela 3; abril 1, mayo 1, junio 1, junio 2, agosto 2 de la parcela 4; abril 1, abril 2, junio 1, agosto 1, de la parcela 5 y abril 2, mayo 1, julio2, agosto 1 de la parcela 6 se ajustan a una distribución agregada en una y aleatoria en la otra (Tabla 2).

El valor de k causa que los comportamientos de los datos sean aleatorios y agregados en las pruebas de binomial negativa y poisson para la misma fecha de muestreo, aunque binomial negativa lo detecta como agregado, la agregación es muy débil por lo que poisson lo detecta como aleatorio, por lo que, al realizar el ajuste estadístico por máxima verosimilitud, ambos modelos se ajusten a los datos indistintamente (Cole, 1946; Morris, 1954; Southwood, 1978 y Taylor, 1984).

Las pruebas de Green y dispersión detectaron los dos tipos de comportamiento aleatoriedad y agregación para la misma fecha muestreo como por ejemplo en marzo 2 para la parcela 1 índice de dispersión mostro agregación y green aleatoreidad.

Tabla 2. Índices de dispersión y distribuciones estadísticas de la roya del café, elaboración propia con datos de los muestreos en parcelas de Amatepec en el periodo comprendido de marzo a agosto del 2021. Parcela 1

Fecha	Índice de dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial negativa	k
Marzo 1	2.11s	0.58	NS	S	2.14
Marzo 2	1.65s	0	NA	NA	-
Abril 1	0.65ns	0.31	NS	S	0.96
Abril 2	1.97s	0.96	NS	S	4.19
Mayo 1	2.08s	0.74	NA	NA	-
Mayo 2	1.27s	0.69	NS	S	3.71
Junio 1	1.74s	0	NS	S	2.64
Junio 2	1.82s	0.92	S	S	33.81
Julio 1	0.33ns	0.28	NS	S	4.73
Julio2	0.72ns	0.17	NS	S	0.85
Agosto 1	1.35s	0.70	NS	S	1.26
Agosto 2	1.49s	0.49	NS	S	4.28

Nota: S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= NoAjustada.

Tabla 2. Continuación. Parcela 2

Fecha	Índice de dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial negativa	k
Marzo 1	1.63s	0	S	S	42.13
Marzo 2	1.34s	0.62	NS	S	2.74
Abril 1	1.88s	0	NS	S	1.09
Abril 2	1.57s	0.37	NS	S	3.43
Mayo 1	2.17s	0.41	NS	S	2.59
Mayo 2	1.96s	0.86	NS	S	1.92
Junio 1	1.48s	0	NS	S	0.68
Junio 2	0.29ns	0.59	NS	S	4.16
Julio 1	2.05s	0.34	NS	S	3.49
Julio 2	0.52ns	0.17	NS	S	2.61
Agosto 1	2.35s	0.59	S	S	39.73
Agosto 2	1.25s	0.18	S	S	35.14

Nota: S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= No Ajustada.

Tabla 2. Continuación. Parcela 3

Fecha	Índice de dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial negativa	k
Marzo 1	2.83s	0.94	NS	S	3.65
Marzo 2	2.72s	0.38	NS	S	2.18
Abril 1	2.09s	0.29	NS	S	0.57
Abril 2	1.66s	0	NS	S	1.19
Mayo 1	2.13s	0	NS	S	2.74
Mayo 2	1.90s	0.31	NA	NA	-
Junio 1	2.61s	0.82	NS	S	4.52
Junio 2	2.87s	0.77	NS	S	3.11
Julio 1	0.79ns	0.52	NA	NA	-
Julio 2	1.35s	0	NS	S	2.84
Agosto 1	0.44ns	0.34	NS	S	3.68
Agosto 2	1.24s	0.15	NS	S	2.13

Nota: S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= No Ajustada.

Tabla 2. Continuación. Parcela 4

Fecha	Índice de dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial negativa	k
Marzo 1	1.17	0.21	NS	S	0.13
Marzo 2	2.58	0.96	NA	NA	-
Abril 1	1.29	0	NS	S	3.29
Abril 2	1.60	0.54	NS	S	2.06
Mayo 1	0.57ns	0.79	NS	S	4.28
Mayo 2	1.46	0.63	S	S	32.10
Junio 1	0.44ns	0.51	S	S	38.14
Junio 2	0.31ns	0.28	NS	S	5.05
Julio 1	2.75	0.14	NS	S	3.14
Julio 2	2.31	0.29	NS	S	2.37
Agosto 1	1.92	0.46	NS	S	0.59
Agosto 2	2.48	0	NS	S	1.72

Nota: S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= No Ajustada.

Tabla 2. Continuación. Parcela 5

Fecha	Índice de dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial negativa	<i>k</i>
Marzo 1	1.19	0.53	NS	S	1.84
Marzo 2	2.06	0.40	NA	NA	-
Abril 1	0.34ns	0.18	NS	S	3.67
Abril 2	2.84	0	NS	S	1.32
Mayo 1	1.29	0.79	NS	S	2.66
Mayo 2	2.33	0.35	NS	S	3.75
Junio 1	1.75	0	NS	S	3.07
Junio 2	2.92	0.59	NA	NA	2.45
Julio 1	2.56	0.40	NS	S	1.97
Julio 2	1.38	0.25	NS	S	0.53
Agosto 1	0.85ns	0.79	NS	S	2.85
Agosto 2	1.64	0.25	NS	S	3.77

Nota: S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= No Ajustada.

Tabla 2. Continuación. Parcela 6

Fecha	Índice de dispersión	Índice de Green	Poisson	Binomial negativa	<i>k</i>
Marzo 1	1.39	0.25	NS	S	2.77
Marzo 2	1.55	0.60	NA	NA	-
Abril 1	1.28	0.39	NS	S	1.94
Abril 2	0.62ns	0.86	NS	S	0.36
Mayo 1	2.09	0	NS	S	3.89
Mayo 2	2.48	0.46	NS	S	2.45
Junio 1	1.74	0.25	NS	S	5.13
Junio 2	1.44	0.17	NS	S	2.19
Julio 1	2.39	0.92	NS	S	1.65
Julio 2	0.48	0.45	NA	NA	-
Agosto 1	1.57	0	NA	NA	-
Agosto 2	2.88	0.31	NS	S	1.36

Nota: S=Significativa; NS= No Significativa; nivel de significación al 5%; NA= No Ajustada.

Demostrando que hay limitantes para evaluar distribuciones en el comportamiento de plagas con estadística clásica, autores como como Ramírez (2009), también encontraron limitaciones en sus estudios de comportamiento espacial, esto podría deberse a que estas pruebas no toman en cuenta la naturaleza bidimensional de las poblaciones (espacio-tiempo), por lo que la información que se obtiene tiene un límite en el análisis de la variable, así como su aplicación.

Análisis geoestadístico

Con los datos obtenidos de los muestreos se generó la modelización espacial y derivado de los 12 muestreos por cada una de las 6 parcelas se obtuvieron 72 semivariogramas, los cuales fueron ajustados. Para todas las parcelas en las diferentes fechas de muestreo presento una pepita ligeramente por arriba de cero, rangos entre los 2.6 y 20.4, dependencia espacial alta, se ajustaron a un modelo esférico, exponencial y gaussiano (Tabla 3).

En el valor de la pepita entre el valor de la meseta revelo una alta dependencia espacial en todas las fechas de muestreo, lo cual indica alta dependencia entre las poblaciones de roya (Cárdenas, 2017; Rossi *et al.* 1992). El efecto pepita, además, dice que no se encontró errores de muestreo y que la escala utilizada fue la correcta para el levantamiento de datos de la roya del café y que los modelos ajustados tienen un 98 % de certeza (Oliver y Webster, 1998).

Los centros de agregación vistos en los mapas y los modelos muestran aleatoriedad esto como resultado de la diseminación o transporte de esporas del hongo por factores ambientales como el viento, la lluvia y el productor de una parcela a otra (Mora, 2015), con esto se podría conjeturar que los comportamientos esférico, gaussiano y exponencial son comunes para este periodo de evaluación de la enfermedad, estos tres modelos, indican que las agregaciones de la enfermedad se presentan en mayor cantidad en ciertas zonas de la parcela respecto al resto de puntos considerados en el muestreo. El ajuste al modelo esférico evidencia que en el área de muestreo hay zonas en las que se presenta más la enfermedad respecto al resto de puntos muestreados, por lo tanto, se presentan focos de infestación de la plaga que crecen o se dispersan desde una fuente puntual u origen. El modelo gaussiano muestra que los centros de agregación crecen de forma continua dentro del área de muestreo con lo que se puede suponer que diversos factores promueven una diseminación más rápida de *Hemilea vastatrix*. El modelo exponencial denota un crecimiento de la enfermedad de forma constante en la parcela (Acosta, *et al.*, 2017).

Tabla 3. Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas de incidencia de roya del café en la parcela 1, elaboración propia con datos de los muestreos en parcelas de Amatepec en el periodo comprendido de marzo a agosto del 2021. Parcela 1

Fecha	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/mes	Dep. Esp.
Marzo 1	3.935	32.37263819	Exponencial	0.29	39.48	16.8	0.007345491	Alta
Marzo 2	3.938	32.37263819	Exponencial	0.29	44.18	19.8	0.006564056	Alta
Abril 1	4.885	55.8610804	Gaussianno	0.01	54.32	4.75	0.000184094	Alta
Abril 2	4.888	55.8610804	Gaussianno	0.01	54.32	4.75	0.000184094	Alta
Mayo 1	4.43	30.69859296	Gaussianno	1	29.76	2.56	0.033602151	Alta
Mayo 2	4.43	30.69859296	Gaussianno	1	29.76	2.56	0.033602151	Alta
Junio 1	0.43	4.728743719	-	-	-	-	-	-
Junio 2	0.42	4.728743719	-	-	-	-	-	-
Julio 1	0.4	4.728743719	-	-	-	-	-	-
Julio 2	0.41	4.728743719	-	-	-	-	-	-
Agosto 1	2.46	10.84261307	Esférico	1	10.45	3.48	0.09569378	Alta
Agosto 2	2.46	10.84261307	Esférico	1	10.45	3.48	0.09569378	Alta

Tabla 3. Continuación. Parcela 2

Fecha	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/mes	Dep. Esp.
Marzo 1	8.84	45.5119598	Exponencial	0.01	44.16	16.8	0.000226449	Alta
Marzo 2	8.84	45.5119598	Exponencial	0.01	44.16	16.8	0.000226449	Alta
Abril 1	9.715	50.6168593	Esférico	0.99	48.45	18	0.020433437	Alta
Abril 2	9.72	50.6168593	Esférico	0.99	48.45	18	0.020433437	Alta
Mayo 1	8.885	51.91133166	Esférico	1	46.8	20.4	0.021367521	Alta
Mayo 2	8.888	51.91133166	Esférico	1	46.8	20.4	0.021367521	Alta
Junio 1	0.46	4.330050251	-	-	-	-	-	-
Junio 2	0.48	4.330050251	-	-	-	-	-	-
Julio 1	0.47	4.330050251	-	-	-	-	-	-
Julio 2	0.44	4.330050251	-	-	-	-	-	-
Agosto 1	3.04	13.5561809	Exponencial	1	13.02	15.39	0.076804916	Alta
Agosto 2	3.041	13.5561809	Exponencial	1	13.02	15.39	0.076804916	Alta

Tabla 3. Continuación. Parcela 3

Fecha	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/mes	Dep. Esp.
Marzo 1	7.34	61.06974874	Exponencial	1	59.78	7.84	0.016728003	Alta
Marzo 2	7.38	61.06974874	Exponencial	1	59.78	7.84	0.016728003	Alta
Abril 1	5.375	43.35113065	Esférico	1	40.48	4.76	0.024703557	Alta
Abril 2	5.378	43.35113065	Esférico	1	40.48	4.76	0.024703557	Alta
Mayo 1	6.385	52.12741206	Exponencial	1	49.92	6.79	0.020032051	Alta
Mayo 2	6.38	52.12741206	Exponencial	1	49.92	6.79	0.020032051	Alta
Junio 1	1.05	6.510050251	-	-	-	-	-	-
Junio 2	1.04	6.510050251	-	-	-	-	-	-
Julio 1	1.001	6.510050251	-	-	-	-	-	-
Julio 2	1.01	6.510050251	-	-	-	-	-	-
Agosto 1	2.125	11.71796482	Esférico	1	11.16	5.04	0.089605735	Alta
Agosto 2	2.122	11.71796482	Esférico	1	11.16	5.04	0.089605735	Alta

Tabla 3. Continuación. Parcela 4

Fecha	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/mes	Dep. Esp.
Marzo 1	4.715	24.01384422	Gaussiano	1	23.52	7.98	0.042517007	Alta
Marzo 2	4.714	24.01384422	Gaussiano	1	23.52	7.98	0.042517007	Alta
Abril 1	4.155	22.73464824	Esférico	0.01	21.62	9.45	0.000462535	Alta
Abril 2	4.161	22.73464825	Esférico	0.01	21.62	9.45	0.000462535	Alta
Mayo 1	3.63	21.63125628	Esférico	1	20.68	10.08	0.048355899	Alta
Mayo 2	3.51	21.63125628	Esférico	1	20.68	10.08	0.048355899	Alta
Junio 1	0.46	2.621507538	-	-	-	-	-	-
Junio 2	0.44	2.621507538	-	-	-	-	-	-
Julio 1	0.41	2.621507538	-	-	-	-	-	-
Julio 2	0.39	2.621507538	-	-	-	-	-	-
Agosto 1	1.975	13.58228643	Esférico	1	12.46	8.82	0.080256822	Alta
Agosto 2	1.974	13.58228643	Esférico	1	12.46	8.82	0.080256822	Alta

Tabla 3. Continuación. Parcela 5

Fecha	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/mes	Dep. Esp.
Marzo 1	5.165	50.11836683	Gaussiano	1	43.5	4.2	0.022988506	Alta
Marzo 2	5.164	50.11836683	Gaussiano	1	43.5	4.2	0.022988506	Alta
Abril 1	4.77	46.31748744	esférico	1	42.3	4.2	0.023640662	Alta
Abril 2	4.77	46.31748744	esférico	1	42.3	4.2	0.023640662	Alta
Mayo 1	4.265	32.90932161	Gaussiano	1	30.69	3.92	0.032583904	Alta
Mayo 2	4.265	32.90932161	Gaussiano	1	30.69	3.92	0.032583904	Alta
Junio 1	0.181	2.339296482	-	-	-	-	-	-
Junio 2	0.18	2.339296482	-	-	-	-	-	-
Julio 1	0.17	2.339296482	-	-	-	-	-	-
Julio 2	0.18	2.339296482	-	-	-	-	-	-
Agosto 1	2.67	24.9759799	Gaussiano	1	24.3458	3.64	0.041074847	Alta
Agosto 2	2.68	24.9759799	Gaussiano	1	24.3458	3.64	0.041074847	Alta

Tabla 3. Continuación. Parcela 6

Fecha	Media	Varianza	Modelo	Pepita	Meseta	Rango	Pep/mes	Dep. Esp.
Marzo 1	5.1	46.01005025	Gaussiano	1	43.7	4.32	0.022883295	Alta
Marzo 2	5.11	46.01005025	Gaussiano	1	43.7	4.32	0.022883295	Alta
Abril 1	4.59	39.73055276	Exponencial	1	39.1987	4.32	0.02551105	Alta
Abril 2	4.6	39.73055276	Exponencial	1	39.1987	4.32	0.02551105	Alta
Mayo 1	4.225	29.31092965	Gaussiano	1	27.3	5.04	0.036630037	Alta
Mayo 2	4.227	29.31092965	Gaussiano	1	27.3	5.04	0.036630037	Alta
Junio 1	3.76	23.56020101	Gaussiano	1	21.6	3.84	0.046296296	Alta
Junio 2	3.76	23.56020101	Gaussiano	1	21.6	3.84	0.046296296	Alta
Julio 1	0.63	4.917688442	-	-	-	-	-	-
Julio 2	0.54	4.917688442	-	-	-	-	-	-
Agosto 1	2.84	18.02452261	Gaussiano	1	17.46	4.8	0.057273769	Alta
Agosto 2	2.84	18.02452261	Gaussiano	1	17.46	4.8	0.057273769	Alta

Elaboración de mapas y superficie infestada

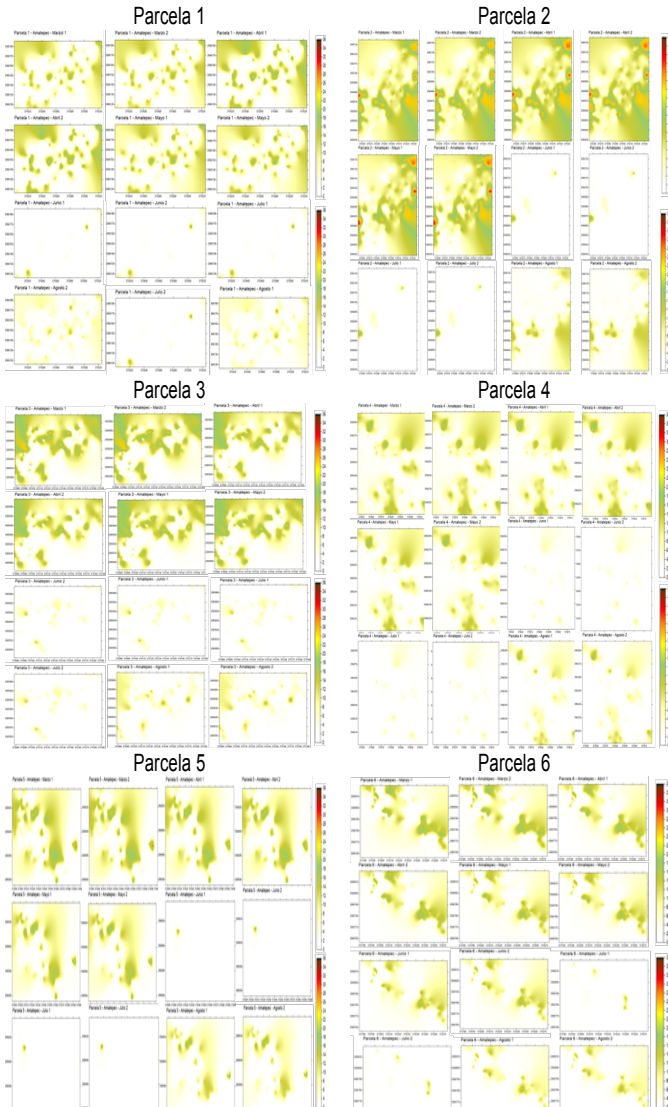
Derivado de los 12 muestreos por cada una de las 6 parcelas se obtuvieron 72 mapas de incidencia de la enfermedad y se calculó la superficie infectada, la escala de colores o varemos de los mapas representan las hojas muestreadas con incidencia de roya y va de 0 a 36 hojas. Estos mapas permitieron ver de forma más gráfica la presencia de la infección del hongo y confirmaron que las poblaciones de *Hemileia vastatrix* se encuentran en centros de agregación (Figura 2).

Estos patrones de agregación muestran la interacción entre los patógenos, o entre los patógenos y el medio, aunque suele existir muchas otras causas probables para la formación de centros de agregación, como el ciclo de vida del patógeno, las características fisiográficas del medio, la naturaleza del hospedero, entre otras (Jiménez *et al.*, 2014; Tannure *et al.*, 2013).

La agregación de *Hemileia vastatrix* mostrada en los mapas coincide por lo descrito por Mora (2015) y Jiménez *et al.* (2013) que describieron el crecimiento de la roya en focos de infección. Estos focos o centros de agregación sirvieron como fuentes y reservorios de inóculo, y tuvieron un crecimiento ascendente en los seis meses de muestreo lo cual coincide con lo reportado por SENASICA en ciclos anteriores. Cabe señalar que en la época de lluvia (septiembre y agosto) hubo poca presencia de roya, lo que podría deberse a que la precipitación lava las esporas visibles de la roya, pero también transporta el inóculo a las hojas y plantas aledañas, y con la salida de la lluvia, la humedad residual el aumento de temperatura (horas favorables) y el crecimiento de tejido de nuevo en la planta de los meses siguientes crean las condiciones óptimas para el surgimiento de focos nuevos y el crecimiento o fortalecimiento de los ya existentes como lo muestra la escala de colores en los mapas, esto concuerda con lo encontrado por Jiménez (2014) y Mendoza (2015) quienes estudiaron la producción de inóculo de la roya del café y los factores asociados a su distribución y patogénesis.

El estudio espacial permitió determinar localizaciones en el espacio geográfico de las parcelas midiendo fielmente los fenómenos fitosanitarios, el nivel de dependencia y su estabilidad, lo que permite inferir una mayor efectividad en comparación con la estadística clásica que presentó contradicciones, esto coincide con los estudios realizados por Ramírez y Porcayo (2010) de distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium sp.*).

Figura 2. Mapas de incidencias de la roya del café en el municipio de Amatepec, periodo marzo-agosto de 2022



De acuerdo con Acevedo y Jiménez *et al.* (2014) las sumas de las condiciones inductivas necesarias para la germinación del hongo causante de la roya son conocidas como horas favorables y son temperaturas entre los 20 y 22 °C y humedades relativas por arriba del 90%, y, según los datos registrados por los *dattalogers*, los meses que reunieron estas condiciones son: septiembre, octubre y noviembre, periodo donde se iniciaron ciclos de infección y reinfección, y según el manual operativo del programa de vigilancia en café 2018 del SENASICA, el periodo de germinación y/o generación de esporas va desde los 26 a los 60 días una vez iniciado el ciclo, esto concuerda con los datos encontrados en campo, en donde el mes uno de muestreo fue el de menor presencia de la roya donde probablemente se iniciaron uno o varios ciclos, y en los siguientes meses la presencia del hongo fue progresiva, siendo los últimos los de mayor presencia, ya que mayor generación de esporas y reinfección a otras hojas o plantas fue aumentando.

En lo que respecta a las superficies infectadas, todas las parcelas muestreadas mostraron un intervalo que va del 4% al 74% en las fechas de muestreo entre marzo y agosto, con un crecimiento de la infección ascendente, y luego un descenso drástico en los meses de lluvia para posteriormente empezar a ascender (Tabla 4).

Fue evidente el progreso de la incidencia de *Hemileia vastatrix* en el tiempo con la aparición de nuevos focos en los mapas elaborados a través de las fechas de muestreo, estos mapas de interpolación por Krigin, además permitieron ver los intensidad de la roya en algunas áreas de la parcela, por lo que de manera práctica y tomando en cuenta también el porcentaje de infestación se puede dirigir las estrategias de control de la roya de forma más precisa a las áreas con altos niveles de incidencia reduciendo así los reservorios de inóculo que inician la propagación con el inicio de las lluvias o la cosecha del café, esto resultaría en ahorros económicos al reducir gastos de compra de insumos y mano de obra para la aplicación, así también se disminuirá el impacto ambiental debido a que el químico que se aplique será menor. Incorporando la agricultura de precisión en el manejo integrado de la enfermedad, también es útil para identificar zonas en donde es necesario realizar labores culturales como podas de café, podas de sombra, deshierbe, abonado con la finalidad reducir los microclimas que promueven las horas favorables para el crecimiento del hongo de la roya (Coria, 2015), justificando así el uso de las técnicas de la agricultura de precisión como una herramienta que permite mantener o reducir los daños causados por la enfermedad en los cafetales del Estado de México (Néstor *et al.*, 2017).

Tabla 4. Porcentaje de superficie infestada por parcela durante el periodo de evaluación

Parcela	Muestreo	Superficie infestada %	Parcela	Muestreo	Superficie infestada %
Parcela 1	marzo 1	54	Parcela 2	marzo 1	73
	marzo 2	55		marzo 2	74
	abril 1	57		abril 1	74
	abril 2	58		abril 2	75
	mayo 1	61		mayo 1	73
	mayo 2	62		mayo 2	73
	junio 1	7		junio 1	7
	junio 2	8		junio 2	6
	julio 1	8		julio 1	5
	julio2	9		julio2	5
agosto 1	62	agosto 1	55		
agosto 2	60	agosto 2	53		
Parcela 3	marzo 1	52	Parcela 4	marzo 1	49
	marzo 2	53		marzo 2	50
	abril 1	55		abril 1	52
	abril 2	55		abril 2	53
	mayo 1	56		mayo 1	53
	mayo 2	56		mayo 2	54
	junio 1	11		junio 1	10
	junio 2	10		junio 2	10
	julio 1	10		julio 1	9
	julio2	12		julio2	8
agosto 1	29	agosto 1	20		
agosto 2	28	agosto 2	22		
Parcela 5	marzo 1	55	Parcela 6	marzo 1	58
	marzo 2	56		marzo 2	58
	abril 1	57		abril 1	56
	abril 2	58		abril 2	56
	mayo 1	58		mayo 1	57
	mayo 2	59		mayo 2	57
	junio 1	4		junio 1	56
	junio 2	4		junio 2	55
	julio 1	5		julio 1	9
	julio2	5		julio2	9
agosto 1	27	agosto 1	29		
agosto 2	29	agosto 2	32		

Superficie infestada y ahorro económico

En cuanto al ahorro económico y el impacto ambiental, hacer una aplicación tomando en cuenta los mapas de infección se puede ahorrar más de \$600 y 0.5 litros de producto por aplicación, por las cuatro aplicaciones como mínimo que se realizan al año para control de la enfermedad en el estado (Tabla 5). Tomando en cuenta que son pequeños productores en su mayoría y que el mercado es reducido, un ahorro de este tamaño se hace significativo, y reduce los costos de producción a través. Además, el ahorro ambiental al dejar de tirar producto innecesario se hace notable a corto y mediano plazo reduciendo el riesgo de contaminación de suelo y agua por arrastre de las lluvias y deriva del producto en la aplicación. Un enfoque focalizado y dirigido de estas actividades de control de roya, como el propuesto por la agricultura de precisión a través del manejo solo de las áreas prioritarias mostradas en los mapas de infección, es capaz de reducir significativamente la dependencia de insumos externos, reduciendo el costo de producción y el daño ambiental, de esta forma se puede encaminar los sistemas de cultivo del café hacia la sustentabilidad, sumado a esto los beneficios a la salud se harán evidentes debido a que el riesgo de residualidad de pesticidas en el grano será eventualmente menos, como lo encontrado por Bonilla en 2015 en un estudio de los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay en donde se realizó un análisis económico que evidenció lo conveniente de usar tecnologías y técnicas asociadas a la agricultura de precisión.

Tabla 5. Porcentaje de superficie infestada y ahorro económico y de ciproconazol en cuatro aplicaciones al año por parcela con un método convencional y otro considerando los mapas de infección por fecha de muestreo

Muestreo	Superficie infestada %	Costo en agricultura (pesos /ha)	
		Convencional	Precisión
<i>Parcela 1</i>			
Marzo 1	54	825	445.5
Junio 1	7	825	57.75
Julio 1	8	825	66
Agosto 1	62	825	511.5
<i>Parcela 2</i>			
Marzo 1	73	825	602.25
Junio 1	7	825	57.75
Julio 1	5	825	41.25
Agosto 1	55	825	453.75
<i>Parcela 3</i>			
Marzo 1	52	825	429
Junio 1	11	825	90.75
Julio 1	10	825	82.5
Agosto 1	29	825	239.25
<i>Parcela 4</i>			
Marzo 1	49	825	404.25
Junio 1	10	825	82.5
Julio 1	9	825	74.25
Agosto 1	20	825	165
<i>Parcela 5</i>			
Marzo 1	55	825	453.75
Junio 1	4	825	33
Julio 1	5	825	41.25
Agosto 1	27	825	222.75
<i>Parcela 6</i>			
Marzo 1	58	825	478.5
Junio 1	56	825	462
Julio 1	9	825	74.25
Agosto 1	29	825	239.25

Tabla 5. Continuación

Muestreo	Ahorro (pesos /ha)	Fungicida aplicado (l/ha)		Ahorro en fungicida (l/ha)
		Convencional	Precisión	
<i>Parcela 1</i>				
Marzo 1	379.5	0.5	0.27	0.23
Junio 1	767.25	0.5	0.035	0.465
Julio 1	759	0.5	0.04	0.46
Agosto 1	313.5	0.5	0.31	0.19
<i>Parcela 2</i>				
Marzo 1	222.75	0.5	0.365	0.135
Junio 1	767.25	0.5	0.035	0.465
Julio 1	783.75	0.5	0.025	0.475
Agosto 1	371.25	0.5	0.275	0.225
<i>Parcela 3</i>				
Marzo 1	396	0.5	0.26	0.24
Junio 1	734.25	0.5	0.055	0.445
Julio 1	742.5	0.5	0.05	0.45
Agosto 1	585.75	0.5	0.145	0.355
<i>Parcela 4</i>				
Marzo 1	420.75	0.5	0.245	0.255
Junio 1	742.5	0.5	0.05	0.45
Julio 1	750.75	0.5	0.045	0.455
Agosto 1	660	0.5	0.1	0.4
<i>Parcela 5</i>				
Marzo 1	371.25	0.5	0.275	0.225
Junio 1	792	0.5	0.02	0.48
Julio 1	783.75	0.5	0.025	0.475
Agosto 1	602.25	0.5	0.135	0.365
<i>Parcela 6</i>				
Marzo 1	346.5	0.5	0.29	0.21
Junio 1	363	0.5	0.28	0.22
Julio 1	750.75	0.5	0.045	0.455
Agosto 1	585.75	0.5	0.145	0.355

Conclusiones

Los métodos no espaciales presentaron serias deficiencias y limitaciones para evaluar la distribución de roya del café, a diferencia del método espacial que permitió determinar perfectamente el tipo de distribución. El análisis geoestadístico indicó alta dependencia espacial.

Los índices de dispersión y las distribuciones estadísticas mostraron de manera general un comportamiento agregado de la roya. Los centros de agregación son aleatorios y se presentan como focos de infección dentro de la parcela. Los mapas son una herramienta útil para calcular un ahorro económico basado en la superficie infestada.

Es importante conocer el porcentaje de infección, así como la ubicación de los focos de infección y el proceso epidemiológico de la enfermedad, y de esta manera realizar un control dirigido que permita un ahorro económico y menor deterioro al ambiente al reducir la cantidad de químicos a aplicar.

Fuentes consultadas

- Acevedo-Sánchez G. y Mora-Aguilera (2016). Desarrollo de REG-N Café v1.0 para determinar n-sitios de monitoreo-muestreo regional de Roya del Cafeto en México usando criterios epidemiológicos ponderados. In. 49º Congreso Brasileiro de Fitopatología, 29 agosto – 01 septiembre. Alagoas Maceio. Brasil.
- Acosta-Guadarrama, A. D., Ramírez-Dávila, J. F., Rivera-Martínez, R., Figueroa-Figueroa, D. K., Lara-Díaz, A. V., Maldonado-Zamora, F. I., & 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(2), 435-446.
- Aguilera, G. M., Sánchez, G. A., Ramos, C. M., & González, L. R. J. (2015). Protocolo de delimitación de focos (pdf) de roya del cafeto (*Hemileia vastatrix*) en zonas cafetaleras de Chiapas, Veracruz y Puebla.
- Alves, M. C., Pozza, E. A., Machado, J. C., Araújo, D. V., Talamini, V., & Oliveira, M. S. (2006). Geoestatística como metodologia para estudar a dinâmica espaço-temporal de doenças associadas a *Colletotrichum* spp. transmitidos por sementes. *Fitopatologia Brasileira*, 31, 557-563.
- APS (2011). The American Phytopathological Society. Coffee rust (*Hemileia vastatrix*). En línea: <http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/>

- fungi/Basidiomycetes/Pages/CoffeeRust.aspx. Fecha de consulta: 08 de septiembre de 2020.
- Barrera, J. F., Avelino, J., Huerta, G., Herrera, J., & Gómez, J. (2013). La roya del café, crónica de una devastación anunciada. *Ecofronteras*, 22-25.
- Bonilla, C., Terra, J. A., Gutiérrez, L., & Roel, Á. (2015). Cosechando los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 19(1), 112-121.
- Cárdenas Pardo NJ, Darghan A, Sosa Rico MD, Rodríguez A. (2017). Análisis espacial de la incidencia de enfermedades en diferentes genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en El Yopal (Casanare), Colombia. *Acta biol. Colomb.* 22(2):209-220. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v22n2.61161>.
- Cardoso, S. A. (1999). Amatepec. Monografía Municipal. Instituto Mexiquense de la Cultura. Primera Edición. Toluca, Estado de México. https://sic.gob.mx/ficha.php?table=fondo_editorial&table_id=406 [Fecha revisión: 12 mayo 2022].
- Chilés, J. P. y Delfiner, P. (1999). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons, Nueva York. Pp.695. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tZl07WdjYHgC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Chil%C3%A9s,+J.+P.+y+Delfiner,+P.+1999.+Geostatistics:+Modeling+spatial+uncertainty.+John+Wiley+%26+Sons,+Nueva+York.+Pp.695&ots=kMFAVQaMHh&sig=M13W1dt7tLDe1Oj41scwSlXfeII#v=onepage&q&f=false>
- Cristancho, MA, Rozo, Y, Escobar, Rivillas C, CA, and Gaitán, AL. (2012). Outbreak of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Colombia. *New Disease Reports* 25, 19. [doi:10.5197/j.20440588.2012.025.019].
- Cole, L. (1946). A theory for analyzing contagiously distributed populations. *Ecology*. 27: 329 -341.
- Coria-Contreras, J., Mora-Aguilera, G., Martínez-Bolaños, M., Guzmán-Deheza, A., Acevedo-Sánchez, G. y Flores-Sánchez, J. (2014). Fluctuación estacional de uredosporas de *Hemileia vastatrix* en el Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 32 (S):42.
- Chilés y Delfiner, P. (1999). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons, Nueva York. Pp.695.
- EPPO. (2014). European and Mediterranean Plant Protection Organization. En línea: <http://www.eppo.int>. Fecha de consulta: Enero de 2020.
- Gallardo A. (2006). Geostadística. Departamento de Ecología y Biología Animal. Facultad de Biología, Campus de Lagoas-Marcosende, Universidad de Vigo, 36310 Vigo. Departamento de Sistemas Físicos, Químicos y Natu-

rales, Universidad Pablo de Olavide. . Ecosistemas. 2006/3 (URL: [http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=431&Id_Categoria= 1&tipo=portada](http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=431&Id_Categoria=1&tipo=portada))

- Hevesi, J., Istok, J. y Flint, A. (1992). Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part. I. Structural analysis. *Journal of Applied Meteorology*. 31 (7): 661 –680.
- Isaaks, E. H. y Srivastava, R.M. (1989). An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, Nueva York. Pp.561.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), (2014). MANUAL DE DEPRECISIÓN AGRICULTURA, Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur.
- Jiménez, R. A., Ramírez, J. F., Sánchez, J. R., Salgado, M. L., Laguna, A. (2013). Modelización espacial de *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) en tomate de cáscara por medio de técnicas geoestadísticas. *Revista Colombiana de Entomología*, 39, 183-192. [Links]
- Jiménez-Pino, A., Maistrello, L., Lopez-Martinez, M. A., Ocete-Rubio, M. E., & Soria-Iglesias, F. J. (2011). Spatial distribution of *Cydia fagiglandana* (Zeller) in an exploited holm oak (*Quercus ilex* L.) forest. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(2), 570-579.
- López-Granados, F., Jurado-Expósito, M., Atenciano, S., García-Ferrer, A., Sánchez, M. y García-Torres, L. (2002). Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant and Soil*. 246: 97-105.
- 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>
- Moral G. F. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Revista Ecosistemas*. 13 (1): 78-86.
- Mora-Aguilera, G., Acevedo-Sánchez G., Gloria Contreras J., González-Gómez R., López-Buenfil, A. y Javier – López, M., A. (2015). Aertas tempranas para el manejo de focos de roya del cafeto en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33 (S): 62
- Oliver, M. & R. Webster. (1991). How geostatistics can help you. *Soil Use and Management*, 7: 206-217

- Perry, N. y Klukowsky, Z. (1997). Spatial distributions of counts at the edges of sample areas. VI Conferencia de la sociedad de biometría. Córdoba, España. Pp. 103- 108.
- Ramírez Dávila, J. F., & Porcayo Camargo, E. (2010). Estudio comparativo de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en la ladera norte del Parque Nacional Nevado de Toluca, México. *Bosque* (Valdivia), 31(1), 28-38.
- Ramírez-Dávila, J. F., & Porcayo-Camargo, E. L. V. I. A. (2009). Estudio de la distribución espacial del muérdago enano (*Arceuthobium* sp.) en el Nevado de Toluca, México, utilizando el Método del SADIE. *Madera y bosques*, 15(2), 93-112.
- Ramírez-Dávila, J. F., González-Andujar, J. L., López, M. A., y Ocete, R. (2005). Modelización y mapeo de la distribución espacial de las ninfas del mosquito verde *Jacobiasca lybica* (Bergevin & Zanon) (Hemiptera: Cicadellidae) en viñedo. *Bol. San. Veg. Plagas*. 31: 119-132.
- Ramírez-Dávila, J. F., González-Andujar, J. L., Ocete, R. y López, M. A. (2002). Descripción geoestadística de la distribución espacial de los huevos del mosquito verde *Jacobiasca lybica* (Bergenin & Zanon) (Homoptera: Cicadellidae), en viñedo: modelización y mapeo. *Boletín de Sanidad Vegetal Plagas*. 28:235-240.
- Rayner, R. W. (1961). Germination and penetration studies on coffee rust (*Hemileia vastatrix* B. & Br.) *Annals of Applied Biology* 49, 497-505.
- Rivillas, O.C., Serna, G.C. Cristancho, A.M. y Gaitán, B.A. (2011). La roya del Cafeto en Colombia (Impacto manejos y costos del control, resultados de investigación). Centro Nacional de Investigación del Café (Cenicafe) chinina, Cladas, Colombia. 53 pp.
- Rossi, R., Mulla, J., Journel, G. y Franz, H. (1992). Geostatistical Tools for Modeling and interpreting Ecological Spatial Dependence. *Ecological Monographs*, 62: 277-314.
- SIAP. (2020). Anuario estadístico de la producción agrícola. www.siap.gob.mx (consulta: 17 marzo 2020).
- Southwood TR. (1978). *Ecological Methods*. New York, USA. Wiley/Halsted. 524 p.
- SENASICA (2018). Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. <https://www.gob.mx/senasica> (consulta: 2 junio 2018).
- SIAP (2019). Anuario estadístico de la producción agrícola. www.siap.gob.mx (consulta: 17 marzo 2019).

- Syrjala, E. (1996). A statistical test for a difference between the spatial distributions of two populations. *Ecology*. 77 (1): 75-80.
- Tannure, C. L., Mazza, S. M. Y Giménez, L.I. Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*).
- Taylor L. (1984). Assessing and interpreting the spatial distributions of insect populations. *Annu. Rev. Entomol.* 29: 321-357.
- Trematerra, P. y Sciarretta, A. (2002). Spatial distribution of some beetles infesting a feed mill with spatio-temporal dynamics of *Oryzaephilus surinamensis*, *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum*. *Journal of Stored Products Research*. 40: 363-377.a arabica