

Modelización de la distribución espacial de *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) en *Solanum tuberosum* L. (Solanales: Solanaceae)

Modeling of the spatial distribution of *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae), in *Solanum tuberosum* L. (Solanales: Solanaceae)

José Francisco Ramírez ¹, Elvia Porcayo-Camargo ², Jesús Ricardo Sánchez ¹

Originales: Recepción: 10/08/2012 - Aceptación: 12/06/2013

RESUMEN

La producción de *Solanum tuberosum* L., *Lycopersicon esculentum* Mill. y *Physalis ixocarpa* Brot. (Solanales: Solanaceae) ha sufrido fuertes pérdidas económicas por la presencia de *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) al asociarse con las enfermedades punta morada o “zebra chip”, además de ser el transmisor de *Candidatus Liberibacter solanacearum*. Las alternativas de control utilizadas han carecido de eficacia por desconocer la distribución espacial del insecto dentro de la parcela. Conocer dicho comportamiento permitiría focalizar las alternativas de control, haciéndolas más eficaces. Este trabajo tuvo por objetivo modelizar la distribución espacial de los estadios de huevo, ninfa y adulto de *B. cockerelli* obtenidos en muestreos por transectos en un cultivo de papa, utilizando herramientas geoestadísticas. Los resultados indican que la distribución espacial de las poblaciones de huevos, ninfas y adultos de *B. cockerelli* fue de tipo agregada en cada fecha de muestreo. La validación cruzada de los semivariogramas obtenidos corrobora la distribución agregada en las poblaciones de *B. cockerelli*. Por su parte, los mapas elaborados permiten observar la estructura agregada de las poblaciones del insecto, permitiendo identificar áreas infestadas y áreas libres. Se encontró estabilidad espacio temporal para los tres estadios del insecto.

ABSTRACT

The production of *Solanum tuberosum* L., *Lycopersicon esculentum* Mill. and *Physalis ixocarpa* Brot. (Solanales: Solanaceae) is prone to economic losses because of the presence of *Bactericera cockerelli* Sulc., which is related to the Purple Top and “zebra chip” diseases, and is also considered a vector of *Candidatus Liberibacter solanacearum*. The alternatives of control have been inefficient because none of them have considered the spatial behavior of the insect inside the plot. Such behavior would allow focusing the control alternatives, making them more efficient. The purpose of this work was to model the spatial distribution of the eggs, nymphs and adults of *B. cockerelli* which were obtained in potato field by transects samplings, by using geostatistics tools. The results indicate that the spatial distribution of the populations of eggs, nymphs and adults of *B. cockerelli* type was aggregated in each sampling date. The cross validation of the semivariograms corroborates the aggregated distribution of eggs, nymphs and adults of *B. cockerelli*. The generated maps allow observing the aggregated structure of the insect population, letting identify both infested areas and not-infested areas. Spatiotemporal stability was found for the three stages of the insect.

- 1 Laboratorio de Investigaciones Entomológicas y Tecnologías en Agricultura de Precisión. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma del Estado de México. Cerrillo piedras blancas s/n km 15 Carr. Toluca - Ixtlahuaca, entronque al cerrillo. (50200) Toluca, Estado de México. jframirez@uaemex.mx
- 2 El Colegio de la Frontera Sur Unidad San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.

Palabras clave

geoestadística • kriging • estabilidad espacio temporal • paratrioza • zebra chip

Keywords

geostatistics • kriging • spatiotemporal stability • paratrioza • zebra chip

INTRODUCCIÓN

Bactericera cockerelli Sulc. (Hemiptera: Triozidae), comúnmente conocido como "pulgón saltador" o "salerillo", es una plaga que se alimenta de la savia de papa (*Solanum tuberosum* L.), jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) y chile (*Capsicum annum* L.) (Solanales: Solanaceae). En los últimos cinco años ha causado enormes pérdidas económicas a la producción de papa en México, debido a la transmisión de la enfermedad "punta morada de la papa", también llamada zebra chip (10) o huanglongbing (29). Recientemente sus infestaciones han sido asociadas con dicha enfermedad (21) debido a la transmisión de la bacteria *Candidatus Liberibacter solanacearum* (29) y de *Candidatus Liberibacter psyllauros* (12) causantes del *Huanglongbing* en papa. En estudios para determinar el agente causal, se detectó de manera consistente a '*Ca. Liberibacter solanacearum*' en plantas con síntomas de punta morada colectadas en varios lugares de los Estados Unidos, México y Guatemala (29).

Bactericera cockerelli se encuentra ampliamente distribuida en el municipio de Zinacantepec (México) y afecta el cultivo de papa causando pérdidas económicas de hasta el 80% de la producción. Para su control se invierte una gran cantidad de recursos económicos, aunque en la mayoría de los casos con poca eficacia, ya sea por desconocimiento de la distribución espacial, la biología y los hábitos de la plaga, mecanismos de acción de los insecticidas, o bien por una deficiente técnica de aplicación.

El desconocimiento de la distribución espacial ha provocado un uso excesivo de plaguicidas y a consecuencia de ello se ha detectado resistencia de la plaga a los mismos (10). Esto ha traído como consecuencia que los productores dedicados a esta actividad disminuyan considerablemente la superficie sembrada, así como su productividad (2).

La distribución espacial de los organismos ha sido estudiada considerando distribuciones estadísticas e índices de dispersión (1), pero sin considerar la exacta localización espacial de las unidades de muestreo evaluadas, lo cual implica limitaciones en la diferenciación de los patrones espaciales. A su vez, las descripciones de los patrones espaciales son altamente dependientes del tamaño de las unidades de muestreo y de la relación entre la media y la varianza (14), y no tienen en consideración la información espacial. Por otro lado, los métodos geoestadísticos proporcionan una medida más directa de dicha dependencia espacial, debido a que tienen en cuenta la naturaleza bidimensional de la distribución de los organismos a través de su exacta localización espacial. Además permiten elaborar mapas de gran utilidad (3, 25, 31, 35).

Estos métodos permiten, además de estimar la distribución espacial de los insectos, generar mapas con gradientes de infestación, de gran utilidad para detectar zonas que requieran técnicas de control. También permite evaluar posibles preferencias en la estructura de agregación de los insectos y detectar zonas que no presenten infestación (37). En estudios previos (23, 24) realizados en otras localidades se ha encontrado que la distribución del insecto plaga es de tipo agregado, lo que permite suponer que en la localidad de Zinacantepec presentará un comportamiento similar.

Objetivo

- Determinar la distribución espacial de los estadios preimaginales y adulto de *B. cockerelli* en un cultivo de papa del municipio de Zinacantepec, utilizando métodos geoestadísticos. La hipótesis planteada fue que las poblaciones de *B. cockerelli* se establecen en forma agregada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo se realizó en una parcela comercial de papa de 1 ha sembrada con la variedad alpha localizada en el municipio de Zinacantepec, Estado de México, México. Se utilizaron transectos de 100 m considerando como unidad de muestreo la planta de papa que se ubicó cada 10 m.

Se contabilizaron los huevos y las ninfas de *B. cockerelli* seleccionando cinco hojas del estrato superior, medio e inferior de cada planta con la finalidad de cuantificar el insecto en sus tres estadios. Lo cuantificado en cada uno de los tres estratos se sumó y obtuvo el promedio por cada estadio para determinar el total de individuos por planta, sobre todo si se considera que Garzón (10) indica que dicho insecto no presenta preferencia por algún tipo de estrato de la planta. En el caso de los adultos, se realizaron cinco redazos por cada planta, contabilizando la cantidad de adultos capturados en la red entomológica. Cada unidad de muestreo se georreferenció utilizando un DGPS (Model SPS351, Trimble, United States of America).

Se realizaron tres muestreos, abarcando el inicio (01/08/2010), fase intermedia (05/09/2010) y final (03/10/2010) del ciclo del cultivo de papa. Se realizó una exploración estadística de los datos originales de las poblaciones de preimaginales y adultos de *B. cockerelli* para determinar su normalidad. Con el fin de determinar la incidencia de la enfermedad punta morada de la papa, el predio fue dividido en cinco cuadrantes en forma aleatoria, y en cada uno de ellos se inspeccionaron 100 plantas consecutivas en la misma hilera, registrando las que presentaban síntomas de la enfermedad.

Geoestadística

El semivariograma experimental se estimó sobre la base de los datos obtenidos en los muestreos de la población de huevos, ninfas y adultos del insecto plaga. Los semivariogramas experimentales se obtuvieron con el programa Variowin 2.2 (Software for Spatial Data Analysis in 2D. Spring Verlag, New York. USA). El valor experimental del semivariograma se calculó con la siguiente expresión (16, 17):

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

donde:

$\gamma^*(h)$ = valor experimental del semivariograma para el intervalo de distancia h

$N(h)$ = número de pares de puntos muestrales separados por el intervalo de distancia h

$z(x_i)$ = valor de la variable de interés en el punto muestral x_i

$z(x_i+h)$ = valor de la variable de interés en el punto muestral x_i+h

Estimación de los parámetros del modelo de semivariograma

Una vez obtenido el semivariograma experimental, se analizó su ajuste con distintos semivariogramas teóricos (esférico, exponencial, gaussiano, etc.) (6) utilizando el programa ArcGis 9 por medio de la extensión geostatística.

Validación del modelo teórico

La validación se realizó de forma interactiva variando los valores C_0 (efecto de pepita), $C + C_0$ (meseta) y a (alcance), hasta hallar el mejor ajuste. Una vez determinado el modelo teórico de mejor ajuste, el mismo fue validado a través de la determinación de los cuatro parámetros estadísticos de validación cruzada (28) como son:

a) Media de los errores de estimación (MEE):

$$MEE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]$$

donde:

$z^*(x_i)$ = valor estimado de la variable de interés en el punto x_i

$z(x_i)$ = valor medido de la variable de interés en el punto x_i

n = número de puntos muestrales utilizado en la interpolación

La MEE no debe ser significativamente distinta de 0 (Prueba de t), en cuyo caso, indicaría que el modelo de semivariograma permite el cálculo de estimadores insesgados.

b) Error cuadrático medio (ECM):

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]^2$$

Un modelo de semivariograma se considera adecuado si el valor del estadístico es cercano a cero (13).

Error cuadrático medio adimensional (ECMA):

$$ECMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[z^*(x_i) - z(x_i)]}{\sigma_k}$$

donde:

σ_k = desviación estándar del error esperado en la estimación con el krigado (interpolador estadístico de datos). La validez del modelo se satisface si ECMA está comprendido entre los valores $1-2(2/N)^{0.5}$ y $1+2(2/N)^{0.5}$

c) Otro estadístico para validar el ajuste del modelo consiste en que el valor de la varianza de los errores sea menor a la varianza muestral. Se considera que un modelo está validado cuando los rangos de los 4 estadísticos de validación cruzada se cumplen.

Nivel de dependencia espacial

La determinación del grado de relación entre los datos o nivel de dependencia espacial se obtuvo al dividir el efecto pepita entre la meseta y expresando en porcentaje su resultado. Si el resultado es menor de 25% el nivel de dependencia espacial es alta, si se encuentra entre 26 y 75% el nivel de dependencia espacial es moderado y si es mayor de 76% el nivel de dependencia es bajo (5).

Elaboración de mapas

Se realizó la interpolación de valores a través del krigado ordinario que permite la estimación insesgada de valores asociados a puntos que no fueron muestreados. Las estimaciones obtenidas fueron representadas en forma de mapa para cada fecha de muestreo de huevos, ninfas y adultos de *B. cockerelli* mediante el uso del programa Surfer 9 (Surface Mapping System, Golden Software Inc. 809, 14th Street. Golden, Colorado 80401-1866. USA).

Estabilidad espacial y temporal a largo plazo

Se compararon los mapas elaborados con el método del krigado ordinario con la finalidad de establecer si existía o no una estabilidad espacio-temporal de las poblaciones de *B. cockerelli* mediante la utilización de la prueba estadística no paramétrica de Cramér-von Mises (Ψ) modificada por Syrjala (36), tal y como lo aconsejan Liebhold *et al.* (18). Cabe indicar que las comparaciones fueron realizadas con resultados de fechas próximas entre sí, como lo indican Rossi *et al.* (27).

RESULTADOS

Con los datos obtenidos fue posible generar la modelización espacial y mapeo de las poblaciones de *B. cockerelli*. Se estableció el porcentaje de infestación en cada fecha de muestreo y se logró determinar la estabilidad espacio-temporal de este insecto; con ello se consiguió determinar realmente el patrón de comportamiento espacial. Los resultados se detallan a continuación:

Geoestadística

La distribución espacial obtenida en las poblaciones de preimaginales (huevos y ninfas) y adultos de *B. cockerelli* fue de tipo agregada para cada una de las tres fechas de muestreo. Se logró modelizar la distribución espacial de las poblaciones de *B. cockerelli* (tabla 1, pág. 18).

En el muestreo por transectos, el semivariograma experimental se ajustó al modelo esférico para la primera y tercera fecha del estadio huevos, así como en las tres fechas de muestreo para adultos (tabla 1, pág. 18).

18 **Tabla 1.** Parámetros (efecto pepita, meseta y rango) de los modelos ajustados a los semivariogramas obtenidos en el muestreo por transectos, para huevos, ninfas y adultos de *B. cockerelli* en el cultivo de papa.

Table 1. Parameters (nugget, sill and range) of the adjusted models to the semivariograms obtained in sampling by transects, for egg, nymph and adults of *B. cockerelli* in potato.

Estado	Fecha	Media muestral	Incidencia (%) ^a	Modelo de mejor ajuste	Efecto pepita	Meseta	Rango	Pepita/Rango (%)	Nivel de dependencia espacial
	01/08/08	19,98		Esférico	0	890,63	25,20	0	Alta
Huevos	05/09/08	16,45	51	Exponencial	0	454,06	24,00	0	Alta
	03/10/08	11,27		Esférico	0	230,65	27,60	0	Alta
	01/08/08	7,18		Gaussiano	0	173,54	20,40	0	Alta
Ninfa	05/09/08	6,10	53	Gaussiano	0	91,98	21,60	0	Alta
	03/10/08	3,69		Exponencial	0	41,10	28,80	0	Alta
	01/08/08	0,83		Esférico	0	1,81	38,40	0	Alta
Adulto	05/09/08	0,83	48	Esférico	0	1,77	25,20	0	Alta
	03/10/08	0,67		Esférico	0	1,24	26,40	0	Alta

a Porcentaje de plantas con síntomas de la enfermedad, estimada en 100 plantas muestreadas.

a Percentage of plants showing symptoms of the disease, estimated from 100 sampled plants.

Las poblaciones de ninfas se ajustaron al modelo gaussiano en la primera y segunda fecha, mientras que el modelo exponencial se ajustó a las poblaciones de huevos de la segunda fecha de muestreo y de ninfa para la tercera fecha. En todos los modelos ajustados se presentó un efecto pepita igual a cero. Dicho valor indica que la escala de muestreo utilizada en el presente trabajo fue adecuada (tabla 1, pág. 18). Los valores de la meseta se ubicaron en el intervalo de 230,65 a 890,63 en el estadio de huevos; de 41,10 a 173,54 para ninfas y de 1,24 a 1,81 para adultos.

Para los tres estadios se presentó un alto nivel de dependencia espacial en las tres fechas de muestreo en todos los modelos obtenidos (tabla 1, pág. 18), lo que implica que la agregación de los individuos muestreados es muy estable y difícil de disgregarse. Todos los modelos se lograron validar con los parámetros estadísticos al ubicarse dentro del rango aceptable (tabla 2).

Tabla 2. Valores de los estadísticos de la validación cruzada de los semivariogramas obtenidos en el muestreo por transectos: media de los errores de estimación (MEE), error cuadrático medio (ECM) y error cuadrático medio adimensional (ECMA).

Table 2. Value of the statistical calculated from the crossed validation in the semivariograms obtained in sampling by transects: mean estimation error (MEE), mean squared error (ECM) and standardized mean squared error (ECMA).

Estadio	Fecha	Media muestral (individuos/planta)	Varianza muestral	MEE	ECM	ECMA	Varianza de los errores
Huevo	01/08/08	19,98	7,518	0,11 ^{ns}	0,10	1,11	6,753
	05/09/08	16,45	16,128	0,10 ^{ns}	0,12	1,10	14,531
	03/10/08	11,27	15,295	0,10 ^{ns}	0,11	1,09	12,941
Ninfa	01/08/08	7,18	8,317	0,11 ^{ns}	0,09	1,13	7,642
	05/09/08	6,10	13,242	0,11 ^{ns}	0,07	1,11	11,895
	03/10/08	3,69	15,634	0,13 ^{ns}	0,12	1,06	14,054
Adulto	01/08/08	0,83	1,989	0,11 ^{ns}	0,13	1,11	1,744
	05/09/08	0,83	2,106	0,12 ^{ns}	0,11	1,07	1,871
	03/10/08	0,67	1,440	0,10 ^{ns}	0,10	1,12	1,294

Obtención de mapas

Los mapas de superficie infestada, obtenidos en el muestreo por transectos, demuestran que las poblaciones de *B. cockerelli* se ubican en centros de agregación; es decir, las poblaciones de huevos, ninfas y adultos se concentran principalmente en puntos específicos (figura 1, págs. 20-21).

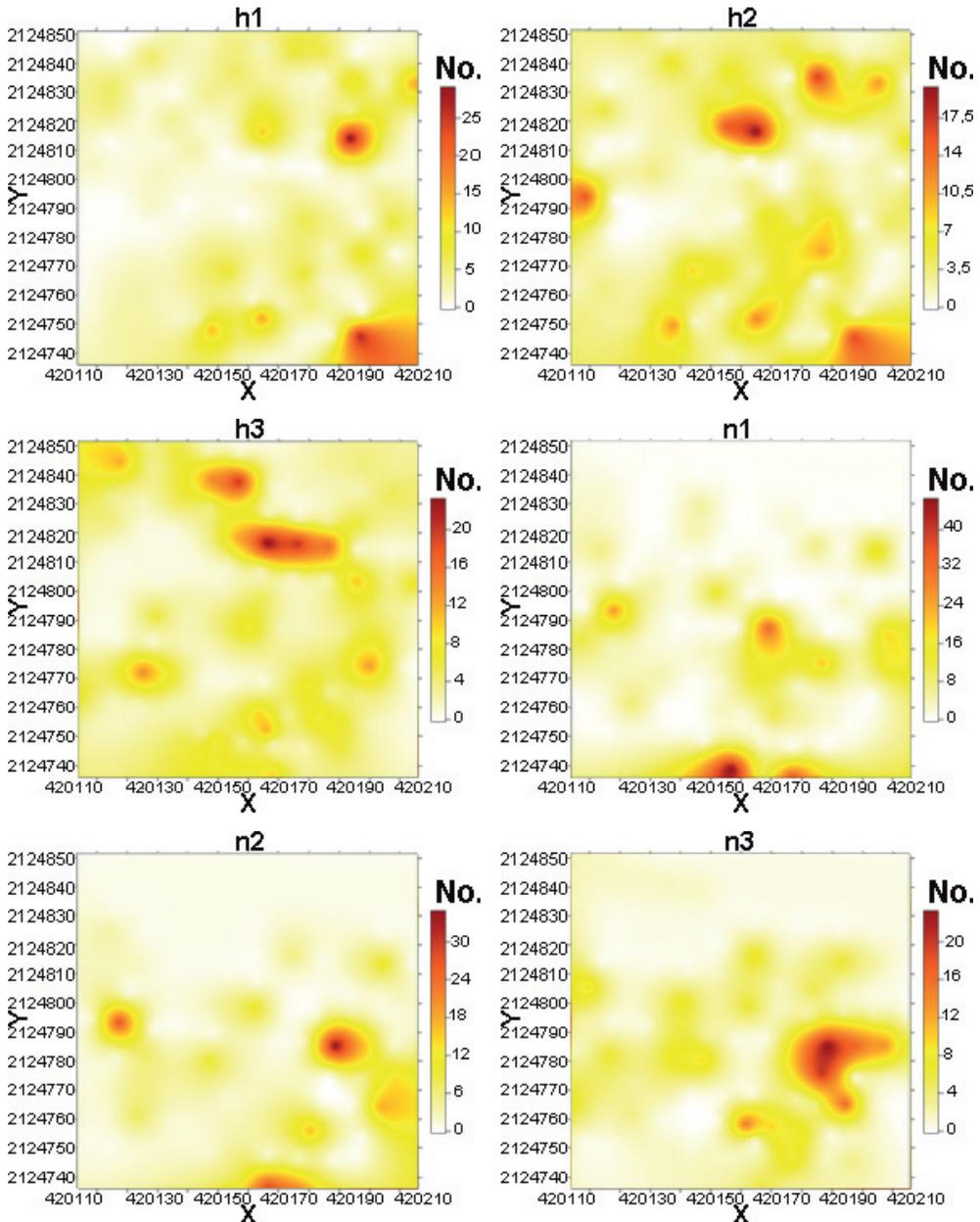
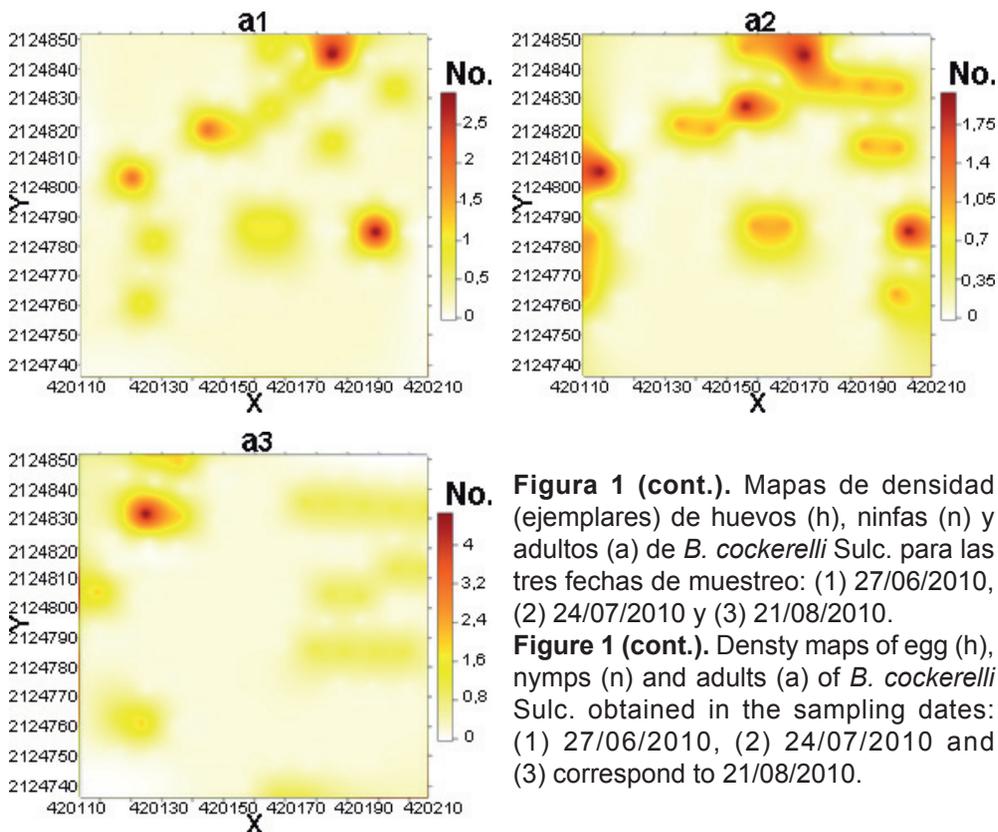


Figura 1. Mapas de densidad (ejemplares) de huevos (h), ninfas (n) y adultos (a) de *B. cockerelli* Sulc. para las tres fechas de muestreo: (1) 27/06/2010, (2) 24/07/2010 y (3) 21/08/2010.

Figure 1. Density maps of egg (h), nymphs (n) and adults (a) of *B. cockerelli* Sulc. obtained in the sampling dates: (1) 27/06/2010, (2) 24/07/2010 and (3) correspond to 21/08/2010.



Para el estadio de huevos, sus poblaciones se distribuyen sobre toda el área, lo cual es indicativo de la presencia del insecto sobre casi toda la parcela de papa. Sin embargo, el mapa generado en la primera fecha de muestreo presenta una ubicación de sus centros de agregación más concentrados hacia la región derecha, por lo que la invasión del insecto parece provenir de las parcelas vecinas de papa localizadas en esa zona, y luego avanzar hacia el resto de la parcela. En los mapas generados para la segunda y tercera fecha de muestreo se observa una mayor cantidad de centros de agregación determinando una superficie total infestada estimada de 84 al 85%.

Respecto del estadio de ninfas, los mapas indican la presencia de densidades medias semejante en puntos muy específicos, ubicándose los centros de agregación en la zona central e inferior del mapa, en las tres fechas de muestreo (figura 1). La interpolación geoestadística determinó una superficie infestada con el insecto estimada muy similar en las tres fechas de muestreo, que varió entre el 40 y el 44% (tabla 3, pág. 22).

Los mapas de las poblaciones de adultos reflejan que *B. cockerelli* se agrupa en centros específicos de agregación en el cultivo de papa en las tres fechas de muestreo, a pesar de su hábito migratorio. La ubicación de dichos centros presenta la tendencia

de localizarse en la zona central del mapa y hacia el margen superior derecho, en las dos primeras fechas de muestreo, con una ligera disminución en la cantidad de centros de agregación para la tercera fecha de muestreo. En este último mapa se observa que la tendencia de su centro de agregación se orienta hacia la parte superior izquierda. La menor superficie infestada estimada se presentó en la tercera fecha de muestreo (tabla 3) con una cantidad promedio de adultos de 0,67 ejemplares por planta (tabla 2, pág. 19). La superficie infestada varió de 82 a 85% para el estadio de huevos; de 40 a 43% para ninfas y de 85 a 88% para el estadio de adultos. En ninguna fecha de muestreo la infestación del insecto alcanzó el 100%.

Tabla 3. Superficie infestada y no infestada estimada (%), discriminando entre los distintos estadios del insecto, obtenida en el muestreo por transectos.

Table 3. Infested and not infested area (%), obtained in sampling by transects.

Estadio	Fecha	Superficie infestada
Huevo	01/08/08	82
	05/09/08	85
	03/10/08	84
Ninfa	01/08/08	40
	05/09/08	44
	03/10/08	43
Adulto	01/08/08	86
	05/09/08	88
	03/10/08	85

Estabilidad espacial y temporal

En la tabla 4 se indican los resultados de la comparación entre los mapas de la distribución espacial de las poblaciones del insecto para cada fecha de muestreo. Los resultados obtenidos con la prueba estadística bivariable de Cramér-von Mises, muestran diferencias no significativas en las comparaciones de estabilidad espacial y temporal de corto plazo entre las diferentes fechas y estadios, lo que indica una estabilidad espacio-temporal de las poblaciones.

Tabla 4. Valores de la comparación de mapas con la prueba bivariable de Cramér-von Mises (Ψ) obtenidos a partir del muestreo por transectos.

Table 4. Values of comparison of density maps through the Cramér-von Mises bivariate test (Ψ) obtained in the sampling by transects.

Estadio	Fechas comparadas*	Ψ	Valor de P	Diferencia (5%)
Huevo	1 vs. 2	0,43	0,52	No Significativa
	2 vs. 3	0,38	0,84	No Significativa
Ninfa	1 vs. 2	0,81	0,72	No Significativa
	2 vs. 3	0,65	0,67	No Significativa
Adulto	1 vs. 2	0,59	0,39	No Significativa
	2 vs. 3	0,48	0,76	No Significativa

* Fecha de muestreo 1: 01/08/2010; fecha de muestreo 2: 05/09/2010; fecha de muestreo 3: 03/10/2010.

* Sampling date 1: 01/08/2010; sampling date 2: 05/09/2010; sampling date 3: 03/10/2010.

DISCUSIÓN

La geoestadística permitió modelizar la distribución espacial de la población de *B. cockerelli* presente en un cultivo de papa de Zinacantepec, bajo una estructura agregada utilizando un muestreo por transectos. Tal agregación se determinó en todos los estadios, para tres fechas de muestreo, aun cuando la densidad del insecto fue diversa en las distintas fechas. Dicha modelización concuerda con lo encontrado por Martini *et al.* (20) y Ramírez *et al.* (24) quienes determinaron la modelización de *B. cockerelli* en parcelas de papa.

Similarmente, la utilidad de los métodos estadísticos para modelizar el comportamiento espacial en plagas, concuerda con lo reportado por Sciarretta *et al.* (33) quienes determinaron la distribución espacial de *Lobesia botrana* Den. & Schiff. (Lepidoptera: Tortricidae) en predios de uva, y con lo encontrado por Bressan *et al.* (4) con *Pentastiridius leporinus* L. (Hemiptera: Cixiidae) en campos de trigo; así como lo establecido por Schotzko & O'Keefe (30) con *Lygus hesperus* Knight (Hemiptera: Miridae) en lentejas, y por Shao-Kui *et al.* (34) con *Helicoverpa armigera* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae) en algodón. La agregación de *B. cockerelli* determinada en el presente trabajo permite sugerir que la reducción de sus infestaciones se puede lograr en el cultivo de papa al focalizar las estrategias de manejo hacia las zonas de la parcela donde se ubican los puntos de agregación, concordando con lo propuesto por Ramírez *et al.* (24) quienes indican realizar el manejo de *B. cockerelli* en puntos específicos.

Se detectaron diversos centros de agregación en los tres estadios de *B. cockerelli*, lo cual indica que las muestras fueron representativas de toda el área muestreada. La incidencia de la punta morada de la papa fluctuó entre 44 y 52% (tabla 1, pág. 18). Los valores de incidencia de la enfermedad en papa asociados con la presencia de *B. cockerelli* estarían más relacionados con la distribución espacial del insecto sobre la superficie infestada que con su densidad media, lo que puede sugerir una alta eficiencia en la transmisión de la enfermedad. Los valores de cero en el efecto pepita de los semivariogramas, obtenidos de los diferentes modelos ajustados, permiten afirmar que la escala de muestreo fue la correcta, mientras que el error de muestreo fue mínimo (22), por lo que los modelos ajustados tienen un 98% de credibilidad (15, 19). Además las funciones estadísticas permitieron validar los modelos esféricos, exponencial y gaussiano que se ajustaron a los tres estadios analizados para cada fecha de muestreo (11).

Por otro lado, las diferentes densidades de población de los tres estadios, obtenidas en el muestreo por transectos, demostraron que el comportamiento de la agregación se ajusta a diversos modelos. En huevos, el comportamiento de la primera y tercera fecha se ajustó al modelo esférico, es decir, su agregación está distribuida de forma uniforme dentro de la parcela; la segunda fecha se ajustó al modelo exponencial, indicativo de que la agregación de *B. cockerelli* se presenta en puntos específicos dentro de la parcela. Las diferencias en los modelos obtenidos pudiera deberse al comportamiento de la plaga en las tres fechas analizadas además

de la preferencia del insecto a plantas fisiológicamente más atractivas, a pesar de existir características homogéneas en el medio ambiente como es la variedad de papa y terreno donde se desarrolló. Por otro lado, la agregación del estadio de ninfas ajustada al modelo gaussiano, en la primera y segunda fecha, indica que el comportamiento de la agregación se expresa en forma continua dentro de la parcela de papa. Finalmente, el comportamiento de la agregación del estadio de adultos fue explicado por el modelo esférico en las tres fechas de muestreo, lo que implica que el adulto se distribuye en toda la parcela por su hábito migratorio en busca de plantas atractivas, fisiológicamente hablando.

El alto nivel de dependencia espacial se debió a la división del valor del efecto pepita entre el valor de la meseta que arrojó un valor menor de 25%, lo cual indica un alto nivel de dependencia espacial para todos los semivariogramas. La alta dependencia espacial permite suponer que las poblaciones de huevos, ninfas y adultos dependen entre sí y su nivel de agregación es alto (27).

El análisis geoestadístico demostró ser una herramienta apropiada para el estudio de la distribución espacial de huevos, ninfas y adultos de *B. cockerelli* presentes en el cultivo de papa. Dichos resultados son similares a los encontrados en otros trabajos (23, 31, 32).

En los mapas de densidad obtenidos con la técnica de krigeado se observan los centros de agregación de las poblaciones de huevo, ninfa y adulto de *B. cockerelli*. La agregación observada en la región derecha del mapa de la primera fecha de muestreo sugiere que las infestaciones provienen de parcelas vecinas, las cuales actúan de refugio o reservorio del insecto. Por su parte, las densidades medias encontradas en las poblaciones en las tres fechas de muestreo permitieron describir diversos tipos de comportamientos de los centros de agregación, lo cual concuerda con Fleischer *et al.* (8), quienes indicaron la relación existente entre la densidad media de los insectos y la cantidad de centros de agregación observada a través de los mapas de densidad generados.

Desde el punto de vista de la protección de los cultivos, tal información permite dirigir de forma precisa las diferentes medidas de control del insecto (7, 26) en tiempo real con el uso de mapamóvil. Esto genera beneficios económicos al realizar con menor frecuencia las aplicaciones de plaguicidas, disminuir el consumo de combustibles, retardar el desarrollo de resistencia del insecto al no tratar toda la superficie del cultivo (9), y visualizar la variabilidad poblacional e identificar áreas infestadas y libres de infestación. Los mapas de densidad contribuyen al manejo con precisión de la plaga (7). Paralelamente, Weisz *et al.* (37) señalan que los mapas pueden llegar a ser de gran ayuda en el manejo con precisión de insectos plaga, proporcionando una herramienta para obtener ahorros económicos al reducir la cantidad de insecticida a utilizar. El manejo de focos de infestación permitirá obtener cultivos de papa con bajas densidades del insecto y de las enfermedades que transmite. Consecuentemente, la mejora de la sanidad permitirá tener una mayor productividad del cultivo de la papa en beneficio de los productores. La agregación de *B. cockerelli* observada en los mapas

obtenidos en el presente trabajo refuerza la posibilidad de focalizar las medidas de control sobre las áreas específicas de infestación (26), repercutiendo en un uso menor de plaguicidas, reduciendo la frecuencia de aplicación y por lo tanto una reducción en el uso de energéticos; lo anterior resulta de gran relevancia en el manejo integrado del insecto. Similarmente, los resultados de los mapas permitieron identificar áreas infestadas y áreas libres de infestación. Tal apreciación permite indicar que los estadios de *B. cockerelli* no invadieron el 100% de la superficie de la parcela analizada.

La determinación de áreas libres de infestación de *B. cockerelli* dentro de la parcela estudiada concuerdan con lo reportado por Ramírez & Porcayo (23), quienes obtuvieron mapas con áreas libres de infestación de *Jacobiasca lybica* (Bergenin & Zanon) (Homoptera: Cicadellidae) en viñedos.

El conocimiento de las áreas infestadas con *B. cockerelli* permite precisar el posible ahorro económico obtenido, al no requerir aplicaciones uniformes sobre la parcela, sino únicamente en las zonas determinadas o focalizadas donde está presente la plaga, a través de implementar estrategias de control dirigidas a los centros de agregación (32), sobre todo si se consideran las aplicaciones semanales que realizan contra la plaga sobre toda la superficie del cultivo de papa.

La estabilidad espacio-temporal encontrada en el presente estudio es de gran utilidad ya que permite conocer con anticipación las probables zonas con infestaciones importantes del insecto dentro de la parcela. La estabilidad espacio-temporal determinada es indicativa de la permanencia de los tres estadios de la plaga en el mismo espacio físico y a través del tiempo, así como su posible preferencia a la planta. Dicha estabilidad permitirá realizar acciones preventivas y focalizadas de control (7), que a su vez permitirán mantener niveles bajos de infestación de la plaga, de tal forma que no afecte la productividad de las plantaciones comerciales de papa ni las especies nativas de papa (*Solanum demissum* Lindl.) (Solanales: Solanaceae) que existen en la región de Zinacantepec.

La estabilidad a corto plazo (dentro del mismo ciclo agrícola) encontrada puede deberse a la escasa movilidad de las ninfas, que seguramente permanecieron en la misma planta donde se depositaron los huevos.

CONCLUSIONES

Las técnicas geoestadísticas permitieron modelar la distribución espacial de los diversos estadios de *B. cockerelli* en el cultivo de papa, apreciándose un comportamiento agregado de los mismos. También permitieron determinar que el insecto no presentó una infestación uniforme en su distribución y sí una estabilidad espacio-temporal, que permitiría un manejo más eficiente y focalizado de las poblaciones de la plaga.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alston, R. 1996. Statistical analysis of animal populations. Ph. D. thesis. University of Kent, UK.
2. Anónimo. 2007. CESAVEM (Comité Estado de Sanidad Vegetal del Estado de México). Manual Operativo para la Atención de la Paratrioza *Bactericera cockerelli* Sulc. Comité Estatal de Sanidad Vegetal del Estado de México - SAGARPA.
3. Blom, E. P.; Fleischer, S. J. 2001. Dynamics in the spatial structure of *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Environmental Entomology*. 30: 350-364.
4. Bressan, A.; Moral, J. F.; Sémétey, O.; Boudon-Padieu, E. 2010. Spatio-temporal pattern of *Pentastiridius leporinus* migration in an ephemeral cropping system. *Agricultural and Forest Entomology*. 12: 59-68.
5. Cambardella, C.; Moorman, T.; Novak, J.; Parkin, T.; Karlen, D.; Turco, R.; Konopka, A. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal* 58: 1501-1511.
6. Englund, E.; Sparks, A. 1988. GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) User's Guide. U.S. Environmental Protection Agency. Document EPA/600/4-88/033. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, NV, USA. p. 186.
7. Fleischer, S. J.; Weisz, R.; Smilowitz, Z.; Midgarden, D. 1997. Spatial variation in insect populations and site-specific integrated pest management. In: Pierce, F. J.; & Sadler, E. J. (Eds.). *The state of Site-Specific Management for Agriculture ASA miscellaneous Publication*. Madison, WI. p. 101-130.
8. Fleischer, S. J.; Blom, P.; Emmen, D.; Hower, A. 1998. Dynamics in the spatial continuity of insect density. In: Robert, P.; Rust, R. H.; & Larson, W. E. (Eds.). *Proceedings of 4th International Conference on Precision Agriculture*. St. Paul, MN, American Society of Agronomy, Madison, WI. 133-144.
9. Fleischer, S. J.; Blom, E. P.; Weisz, R. 1999. Sampling in Precision IPM: When The Objective Is a Map. *Phytopathology*. 89: 115-118.
10. Garzón, T. 2004. El "Pulgón Saltador" o la Paratrioza, una amenaza para la horticultura de Sinaloa. Memoria de Taller sobre *Paratrioza cockerelli* Sulc. como plaga y vector de fitoplasmas en hortalizas. Culiacán, Sinaloa, México. p. 124.
11. Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, Nueva York. 483 p.
12. Hansen, A. K.; Trumble, J. T.; Stouthamer, R.; Paine, T. D. 2008. New Huanglongbing (HLB) *Candidatus* species, "*C. Liberibacter psyllaurous*" found to infect tomato and potato is vectored by the psyllid *Bactericera cockerelli* (Sulc). *Applied and Environmental Microbiology*. 74: 5862-5865.
13. Hevesi, J.; Istok, J.; Flint, A. 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I. Structural analysis. *Journal of Applied Meteorology*. 31: 661-676.
14. Hulbert, S. 1990. Spatial distribution of the montane unicorn. *Oikos*. 58: 257-271.
15. Isaaks, E. H.; Srivastava, R. M. 1988. Spatial continuity measures for probabilistic and deterministic geostatistics. *Mathematical Geology*. 20: 313-341.
16. Isaaks, E. H.; Srivastava, R. M. 1989. *An Introduction to applied Geostatistics*. Oxford University Press. New York. 561 p.
17. Journel, A. G.; Huijbregts, C. J. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, U. K. p. 600.
18. Liebhold, M.; Rossi, E.; Kemp, P. 1993. Geostatistics and Geographic Information Systems in applied Insect Ecology. *Annual Review Entomology*. 38: 303-327.
19. Liebhold, A.; Sharov, A. 1998. Testing for correlation in the presence of spatial autocorrelation in insect count data. In: Baumgartner, J.; Brandmayr, P.; & Manly, B. F. J. (Eds.). *Population and community ecology for insect management and conservation*. Balkema, Rotterdam. p. 1-17.
20. Martini, X.; Seibert, S.; Prager, S.; Nansen, C. 2012. Sampling and interpretation of psyllid nymph counts in potatoes. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 143: 103-110.
21. Munyaneza, J. E.; Crosslin, J. M.; Upton, J. E. 2007. Association of *Bactericera cockerelli* (Homoptera: Psyllidae) with "Zebra Chip", a new potato disease in southwestern United States and Mexico. *Journal of Economic Entomology*. 100: 656-663.
22. Oliver, M.; Webster, R. 1991. How geostatistics can help you. *Soil use and Management*. 7: 206-217.
23. Ramírez, J. F.; Porcayo, E. 2008. Distribución espacial de las ninfas de *Jacobiasca libica* (Hemiptera: Cicadellidae) en un viñedo en Andalucía, España. *Revista Colombiana de Entomología* 34: 169- 175.
24. Ramírez, J. F.; Porcayo, E.; Sánchez, J. R. 2011. Análisis de la distribución espacial de *Bactericera cockerelli* Sulc (Hemiptera: Trioziidae) en *Solanum tuberosum* L. en Donato Guerra, México. *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*. 12(1): 12-24.

25. Ramírez, J. F.; González, A.; Sánchez, J. R.; de León, C. 2011. Modelización y generación de mapas del comportamiento espacial de *Sporisorium reilianum* ((Kühn) Langdon y Fullerton) en Estado de México, México. Rev. FCA UNCUYO. 43(2): 157-173.
26. Rong, J.; Dian-Mo, L.; Bao-Yu, X.; Zhe, L.; Dong-Li, M. 2006. Spatial Distribution of Oriental Migratory Locust (Orthoptera: Acrididae) Egg Pod Populations: Implications for Site-specific Pest Management. Environmental Entomology. 35: 1244-1248.
27. Rossi, R.; Mulla, J.; Journel, G.; Franz, H. 1992. Geostatistical Tools for Modeling and interpreting Ecological Spatial Dependence. Ecological Monographs. 62: 277-314.
28. Samper, F. J.; Carrera, J. 1996. Geostatística: Aplicaciones a la Hidrología subterránea. 2nd ed. Centro Internacional de Métodos en Ingeniería, Barcelona, España. 484 p.
29. Secor, G. A.; Rivera, V. V.; Abad, J. A.; Lee, I. M.; Clover, G. R. G.; Loeffing, L. W.; Li, X.; De Boer, S. H. 2009. Association of '*Candidatus Liberibacter solanacearum*' with zebra chip disease of potato established by graft and psyllid transmission, electron microscopy, and PCR. Plant Disease. 93: 574-583.
30. Schotzko, D.; O'Keeffe, L. 1989. Geostatistical description of the spatial distribution of *Lygushesperus* (Heteroptera: Miridae) in Lentils. Journal of Economic Entomology. 82: 1277-1288.
31. Sciarretta, A.; Trematerra, P.; Baumgärtner, P. 2001. Geostatistical analysis of *Cydia funebrana* (Lepidoptera: Tortricidae) pheromone trap catches at two spatial scales. American Entomologist 47: 174-184.
32. Sciarretta, A.; Trematerra, P. 2006. Geostatistical characterization of the spatial distribution of *Grapholita molesta* and *Anarsia ineatella* males in an agricultural landscape. Journal of Applied Entomology. 130: 73-83.
33. Sciarretta, A.; Zinni, A.; Mazzocchetti, A.; Trematerra, P. 2008. Spatial Analysis of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae) Male Population in a Mediterranean Agricultural Landscape in Central Italy. Environmental Entomology. 37: 382-390.
34. Shao-Kui, Ge.; Carruthers, I. R.; Zu-Fei, M.; Guang Zhang, X.; Dian, M. L. 2005. Spatial heterogeneity and population risk analysis of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*, in China. Insect science 12: 255-262.
35. Speight, M.; Hails, R.; Gilbert, M.; Foggo, A. 1998. Horse chestnut scale (*Pulvinaria regalis*) (Homoptera: Coccidae) and urban host tree environment. Ecology 79: 1503-1513.
36. Syrjala, E. 1996. A Statistical Test for a Difference Between the Spatial Distributions of two Populations. Ecology. 77(1): 75-80.
37. Weisz, R.; Fleischer, S.; Smilowitz, Z. 1996. Site-specific integrated pest management for high value crops: Sample units for map generation using the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) as a model system. Journal Economic Entomology. 88: 1069-1080.

Agradecimiento

A la Universidad Autónoma del Estado de México
por el financiamiento del proyecto de investigación del cual se deriva este artículo.