

Aplicación a la distribución espacial de *Helicoverpa armigera* Hb en cultivo de tomate

Técnicas geoestadísticas para la incidencia de una plaga en una parcela

F. J. Moral García*

En este trabajo se muestra como mediante la aplicación de los métodos geoestadísticos se puede obtener unos mapas de incidencia de una plaga de *Helicoverpa armigera* Hb., en una parcela con una plantación de tomate. A partir de unos datos muestrales, consistentes en el número de capturas de individuos en cada una de las trampas instaladas en la parcela experimental, se estudiaron los patrones de variación espacial de las densidades de insectos mediante el uso de variogramas y, con posterioridad, con los métodos de estimación geoestadística, denominados krigea-

do, se consiguió una cantidad de información suficiente para representar las distribuciones espaciales de los insectos. La repetición del proceso, durante varios días, hizo que se obtuvieran una serie de mapas con los cuales se pudo analizar la evolución temporal de la plaga.

Esta información es fundamental para la propuesta de unas técnicas eficaces de lucha contra las plagas y para el desarrollo de una agricultura más eficiente, con el consiguiente beneficio para el agricultor y para el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

Aunque se pueden encontrar muchos trabajos relacionados con las variaciones temporales de diversas poblaciones de insectos, hasta fechas muy recientes era menos común el análisis de las distribuciones espaciales de los mismos, debido a la dificultad que se encontraba en el manejo y análisis de los datos. En algunos casos se intentó analizar la variación espacial de las poblaciones mediante el uso de índices de dispersión, comprobándose como era imposible la distinción de las distintas distribuciones espaciales con esos

métodos, ya que ignoran la localización de las muestras (e.g. Taylor, 1984).

El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) y la aplicación de la geoestadística, ha supuesto un nuevo impulso a los estudios relativos al análisis de la distribución espacial aplicada a la ecología de los insectos.

La geoestadística comprende a un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio, o en el tiempo, de una forma continua. Debido

a su aplicación orientada a los SIG, también se podría definir como la estadística relacionada con los datos geográficos, de ahí que se le conozca además como estadística espacial.

Todo trabajo geoestadístico tiene que llevarse a cabo en tres etapas:

1º) Análisis exploratorio de los datos.

En esta fase se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Sería una etapa de aplicación de la estadística. Se comprueba la consistencia de los datos, eliminándose aquellos que sean erróneos, y se identifican las distribuciones de las cuales

provienen.

2º) Análisis estructural.

Se estudia la continuidad espacial de la variable. En esta etapa se calcula el variograma experimental, o cualquier otra función que nos explique la variabilidad espacial, se ajusta al mismo un variograma teórico y se analiza e interpreta dicho ajuste al modelo paramétrico seleccionado.

3º) Predicciones.

Estimaciones de la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa, en los puntos muestrales, así como la conseguida indirectamente en

* Doctor Ingeniero Agrónomo

forma de tendencias conocidas u observadas. También se pueden realizar simulaciones, teniendo en cuenta los patrones de continuidad espacial elegidos.

En cualquier trabajo geoestadístico, el principal objetivo del mismo es la caracterización de la variable investigada en todas las localizaciones, partiendo de la información suministrada por los puntos muestrales. Los métodos de estimación geoestadística son conocidos como krigeado o krigeaje (kriging en la literatura inglesa, en honor de Danie Krige, quien formuló por primera vez esta metodología en 1951). Las principales características que hacen del krigeado un método de estimación muy superior a los tradicionales, como el inverso ponderado de la distancia, la triangulación, etc., se han descrito en diversas obras (por ejemplo, Goovaerts, 1997; Moral, 2003).

La idea fundamental del krigeado es consecuencia de los conceptos relacionados con la dependencia espacial: los lugares que disten menos entre sí tendrán unos valores de los atributos más semejantes que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más separados. En la naturaleza, esto suele cumplirse y, además, las variables naturales generalmente se distribuyen de una forma continua.

En este trabajo se muestra como, mediante técnicas geoestadísticas fáciles de comprender y utilizar, puede analizarse el patrón de distribución de una plaga en una parcela.

APLICACIONES DE LA GEOESTADÍSTICA EN LA ECOLOGÍA DE LOS INSECTOS.

El uso de los métodos geoestadísticos para el análisis de los patrones de distribución espacial de los insectos es bastante reciente. Los trabajos realizados en pequeñas parcelas, de menos de 500 m², tanto en sistemas naturales (por ejemplo, Liebhold et al., 1991) como agrícolas (por ejemplo, Schotzko y O'Keeffe, 1989), han mostrado que las densidades de insectos muestran importantes discontinuidades locales, reflejándose en el efecto pepita del variograma; incluso en ocasiones, se encuentra un efecto pepita puro, fruto de una variabilidad a una escala menor que la de las muestras.

En trabajos realizados en extensiones mayores, se ha comprobado como las poblaciones de insectos pueden distribuirse continuamente en distancias muy variables. Por ejemplo, Kemp et al. (1989) encontraron como las poblaciones de saltamontes mostraban distribuciones espaciales relacionadas en distancias que variaban entre 1 y 100 km.

Por tanto, las herramientas geoestadísticas constituyen un medio muy eficaz para cuantificar las dependencias espaciales de las poblaciones a distintas escalas.

Si se realizan comparaciones entre los variogramas generados a partir de la captura de individuos en diferentes momentos, se pueden determinar las rela-



ciones entre los patrones de distribución espacial y la dispersión y mortalidad de los insectos. Así, por ejemplo Schotzko y O'Keeffe (1989), compararon en diferentes épocas la distribución espacial de *Lygus hesperus* dentro de una parcela, empleando variogramas. Detectaron que al principio de la temporada, los insectos se encontraban agrupados, debido al emparejamiento, y a medida que avanzaba la temporada, la población se distribuía más uniformemente.

Por el hecho de existir una importante dependencia espacial en las poblaciones de insectos, es importante que las estimaciones del número de individuos en puntos no muestrales se realice a partir de datos obtenidos en puntos cercanos. En numerosos casos relacionados con la ecología y el estudio de las plagas, es precisa la interpolación entre diferentes

conjuntos de muestras dispuestas de una forma estructurada o aleatoria. Para un planteamiento eficaz de una estrategia contra las plagas a gran escala, se necesita que la información suministrada por los puntos muestrales sea tratada convenientemente para valorar la necesidad de tratamientos sobre grandes extensiones. En estos casos, el krigeado da lugar a las "mejores estimaciones", siempre que se cumplan las asunciones en las que se asienta (por ejemplo, Kemp et al., 1989).

En muchas ocasiones, cuando se dispone de conteos de insectos, se tiene que las variables aleatorias representadas por los datos no se aproximan a la distribución normal. En el krigeado, la minimización del error se realiza suponiendo que se conoce el variograma con exactitud. La estimación del variograma es un proceso difícil y no cuantificable; en realidad, los variogramas no

se conocen exactamente. Además, si se supone que el variograma es conocido con exactitud, puede que otros métodos de estimación, no lineales, muestren unos errores de estimación menores. El único caso, en el cual el krigeado da lugar a la mejor estimación absoluta, es aquel donde la función aleatoria tiene una distribución normal. Por eso, suele realizarse una transformación no lineal de los datos (como $x^{1/2}$ o $\log x$) antes del krigeado para hacer que se ajusten a la distribución normal. Sin embargo, con frecuencia, las estimaciones generadas con el krigeado, después de aplicarles la transformación inversa, suelen ser sesgadas. La única transformación que, después del krigeado y de la aplicación de la transformación inversa a las estimaciones, no genera resultados con sesgo es la logarítmica (Journel y Huijbregts, 1978).

Conviene indicar que la aplicación de la geoestadística no se limita al estudio de las densidades o del conteo de insectos. También se puede utilizar para el análisis de la variación espacial en las características genotípicas y fenotípicas de las distintas poblaciones (por ejemplo, Sokal et al., 1987).

MATERIALES Y MÉTODOS

La parcela experimental sobre la cual se realizó el estudio se encuentra situada en el suroeste del término municipal de Badajoz, en las coordenadas $7^{\circ} 4' 45''$ de longitud oeste y $38^{\circ} 46' 25''$ de latitud norte,

dentro de la finca "Benavides". La parcela tiene una forma casi rectangular, con lados de 560 m y 350 m, dando lugar a una superficie de aproximadamente 20 ha, estando plantada completamente con tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.).

Con el fin de establecer los puntos de muestreo en la parcela experimental, se diseñó una retícula regular

de los insectos de la plaga analizada (*Helicoverpa armigera* Hb.), refiriéndose todas ellas sobre un origen de coordenadas previamente establecido en uno de los vértices de la parcela. Las trampas se dispusieron a un metro del suelo, para que la base inferior de las mismas quedaran justo sobre las plantas de tomate. Aunque hubiese sido deseable la instalación

respondientes a las capturas para los días comprendidos entre el 10 y el 22 de julio de 2002, antes de la recolección del fruto.

Para llevar a cabo los análisis geoestadísticos se dispuso del programa SURFER. La elección del mismo se debe, primeramente, a que con él se pueden efectuar todas las fases de un estudio geoestadístico (análisis exploratorio de los datos,

análisis estructural y estimaciones). Además, las representaciones gráficas que se obtienen son de una gran calidad, permitiendo una elevada versatilidad en cuanto a las formas de mostrar la información disponible y su posible exportación para un uso en otras aplicaciones. Otra ventaja podría encontrarse en su amigable y fácil utilización, por lo que un usuario novel no requeriría un gran esfuerzo de aprendizaje.

La base de datos disponible consta de las coordenadas de las trampas y del número de insectos capturados en las 112, para cada uno de los días de muestreo. Dispuesta esta información en un fichero ASCII, en forma tabulada, se procedió a la realización del estudio geoestadístico.

La aplicación de los métodos de estimación geoestadística es adecuada para variables continuas. Cuando se tratan de variables discretas, como son los conteos de insectos en cada trampa, para solucionar ese inconveniente lo que se propone es asignar cada dato muestral al área que representa, dando lugar a una variable con-

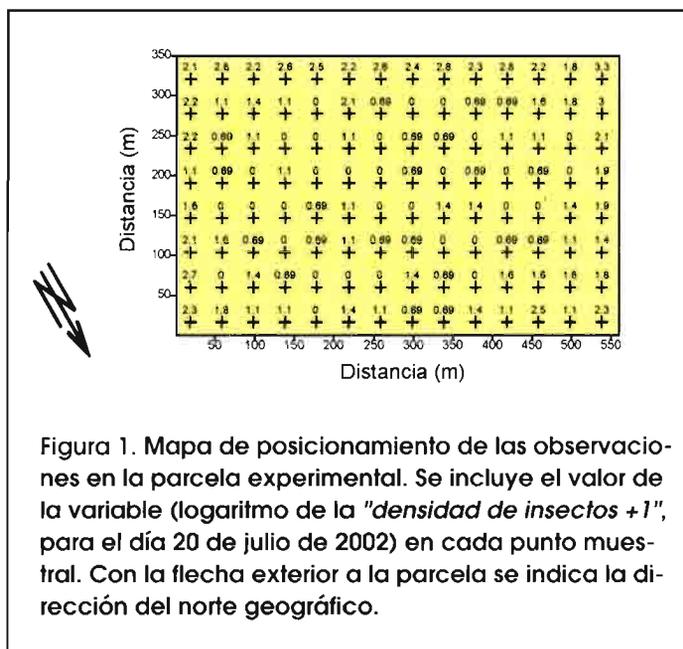


Figura 1. Mapa de posicionamiento de las observaciones en la parcela experimental. Se incluye el valor de la variable (logaritmo de la "densidad de insectos + 1", para el día 20 de julio de 2002) en cada punto muestral. Con la flecha exterior a la parcela se indica la dirección del norte geográfico.

superpuesta sobre la misma. De esa forma, sobre el terreno se determinaron una serie de puntos equidistantes. Se realizaron divisiones cada 43 m, según el lado menor de la parcela, y cada 40 m en el lado mayor. Como resultado, se generaron 8 filas de puntos de muestreo con 14 puntos en cada una de ellas. Por lo tanto, se determinaron 112 puntos distribuidos regularmente sobre el terreno.

En cada uno de los puntos muestrales se instaló una trampa para la captura

de trampas más próximas entre sí, sin embargo no fue posible porque ello hubiera producido una serie de interacciones, debido a que las trampas contenían en su interior una feromona sexual de larga duración atrayente de los machos.

Se efectuaron conteos diarios de los insectos capturados en cada trampa durante una serie de días previos a la recolección del tomate y con posterioridad a la misma. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos con los datos co-

tinua como es la densidad de insectos. En este trabajo, como se realizó un muestreo uniforme sobre toda la parcela experimental, la superficie asociada a cada muestra es la misma, equivalente a las dimensiones de las celdas de la retícula superpuesta sobre la parcela.

Para la descripción de la estructura de correlación espacial de los datos se utilizó el variograma. En la construcción del variograma experimental se consideró una distancia máxima de 330 m, debido a que esa magnitud es aproximadamente la mitad de la diagonal de la parcela, por lo que, si nos situásemos en el centro de la misma, abarcaríamos todos los puntos. Otro parámetro que se tiene que fijar es el incremento de distancia a considerar en el variograma. Se eligió el valor de 47,15 m para que cada dato muestral se emparejase con los cuatro más próximos, en las direcciones norte, sur, este y oeste, teniendo en cuenta además que en el variograma experimental se definirán siete puntos, ya que el producto del incremento de la distancia (47,15) por el número de puntos del variograma (7) debe ser aproximadamente la distancia máxima considerada en el variograma experimental (330). Conviene indicar que con el programa SURFER, para el cálculo del variograma no se considera una tolerancia dimensional de forma explícita. Así, en este caso, el primer punto del variograma se obtiene mediante el emparejamiento de cada dato muestral con aquellos que disten menos de 47,15 m; el segundo punto se obtiene empare-

Tabla 1. Variogramas teóricos ajustados a los diferentes variogramas experimentales.

Día	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Modelo	Exp	Exp	Esf	Exp	Esf	Exp	Exp	Esf	Esf	Esf	Exp	Exp	Esf
Rango	300	300	330	300	315	250	275	300	225	275	190	200	225
Meseta	0,67	0,25	0,30	0,45	0,16	0,15	0,10	0,18	0,38	0,95	0,90	0,55	0,62
Pepita	0,12	0,12	0,15	0,19	0,07	0,09	0,08	0,12	0,23	0,15	0,24	0,18	0,21

(Exp= Exponencial; Esf= Esférico)

jando los datos muestrales con aquellos que disten entre 47,15 y 94,30 m, y así hasta completar la distancia máxima de 330 m.

Hubiera sido deseable el cálculo de más puntos en el variograma, a costa del emparejamiento de cada dato muestral con menos datos vecinos. Sin embargo, en ese caso se perdería la información aportada por los puntos desechados. Así, si por ejemplo se tuvieran 8 puntos en el variograma, el incremento de distancia sería de 41,25 m, ya que la distancia máxima es de 330m. Con ese valor de 41,25 m, cada dato muestral se emparejaría sólo con el situado al norte y al sur del mismo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la primera etapa del estudio geoestadístico, el análisis exploratorio de los datos, se construyeron una serie de histogramas, uno por día. En todos los casos se detectaron unas distribuciones muy sesgadas, que en ningún caso sugería una aproximación a la distribución normal. Por ello, se realizó una transformación logarítmica a los datos, dando lugar a unas distribuciones que mostraban una mayor normalidad, confirmado mediante el cálculo de los estadísticos asociados a cada distribu-

ción (Arranz, 2002). Como en algunas trampas las capturas eran nulas, para evitar el logaritmo de cero se propuso la transformación de la variable *densidad de insectos + 1*.

En esta etapa, entre los muchos tipos de gráficos que se pueden construir (Moral, 2003), es especialmente útil el denominado mapa de posicionamiento de las observaciones (**Figura 1**). Mediante este mapa se indica como se distribuyen los puntos de muestreo en la parcela experimental. Suele emplearse para la detección de errores en la localización de los datos y para analizar la posible presencia de valores anormales.

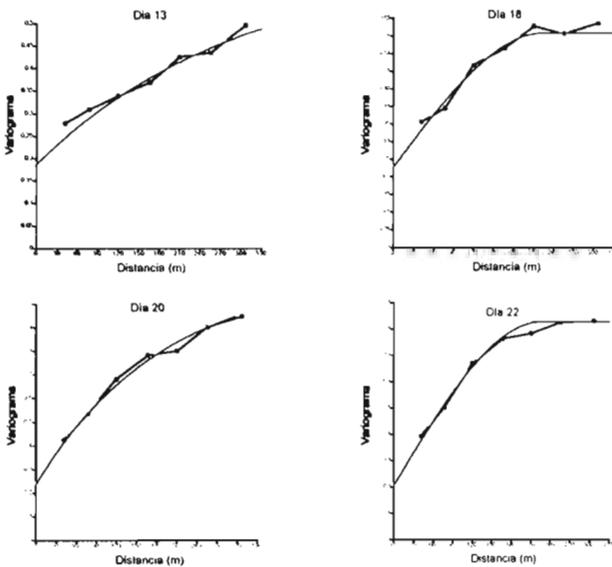
En la fase del análisis estructural de los datos, se eligió la función variograma para la caracterización de la continuidad espacial. Se construyeron variogramas omnidireccionales para cada uno de los días y, con posterioridad, se les ajustaron unos modelos teóricos. Conviene indicar que en ningún caso se consideró la existencia de anisotropía. Con el número de datos disponibles, el cálculo de los variogramas direccionales se hubiesen sustentado sobre muy pocos puntos muestrales, dando lugar a unos resultados que hubieran sido muy deficientes. Dado que la parcela experimental no lindaba con otras

donde hubiera plantaciones de tomate, no es probable la existencia de migraciones de insectos entre parcelas adyacentes, aunque es conocida la capacidad de la *Helicoverpa armigera* Hb. de desplazarse incluso cientos de kilómetros, según las direcciones de los vientos dominantes.

Se ajustaron unos variogramas teóricos esféricos o exponenciales, con un efecto pepita, a los variogramas experimentales. En la **Tabla 1** se tienen los valores de los parámetros de los mismos y, en la **Figura 2**, se muestran los variogramas correspondientes a algunos de los días del estudio. Es necesario que el variograma que se elija refleje el patrón de continuidad espacial de la variable analizada. Una variable como la densidad de insectos en una parcela probablemente se distribuya muy erráticamente en distancias reducidas, con lo que los modelos teóricos más apropiados para los variogramas deben ser el esférico o el exponencial (Isaaks y Srivastava, 1989).

La experiencia ha demostrado que lo fundamental no es la forma analítica del modelo, sino la determinación de los rasgos más notables de la variable estudiada (Goovaerts, 1997). Mediante el uso de un buen programa gráfico que permita la interactividad, como el utili-

Figura 2. Variogramas experimentales (puntos y línea negra) y teóricos (línea azul) para los días indicados



zado en este trabajo, se obtendrán los mejores resultados. Por orden de importancia, se debe considerar el efecto pepita, el rango, la meseta y la anisotropía.

El efecto pepita se estima extrapolando el variograma hasta que corte al eje vertical. El comportamiento del modelo en el origen es muy importante, debido a su influencia en el proceso posterior de estimación. En los variogramas que se obtuvieron en este trabajo, el efecto pepita es bastante considerable en relación con la meseta. Podría haberse disminuido mediante la consideración de datos muestrales más próximos, lo cual no era factible por el problema de interacción entre las trampas. Además, en una variable tan errática a pequeñas distancias como es el número de insectos, es lógico un efecto pepita notable, debido a la variabilidad que existe a una distancia menor que la abarcada por cada retícula asignada a cada dato muestral.

Para caracterizar la distancia hasta la cual existe

dependencia espacial en la densidad de insectos, hay que hallar el rango o alcance. En los casos estudiados, varía entre 190 y 330 m, o sea, la distancia máxima, abarcando la totalidad de la parcela. En general, la dependencia espacial era más acusada en los primeros días, cuando las densidades de insectos eran menores, aunque en todos los casos se extiende a grandes distancias.

La anisotropía es el rasgo menos importante a la hora de caracterizar un modelo. Sólo es obligada su inclusión en los casos donde sea muy intensa según una dirección determinada, ya que influirá muy notablemente en los patrones de distribución que se obtengan. Por los inconvenientes antes mencionados, en este trabajo se consideró la existencia de isotropía.

Para la estimación en los puntos no muestrales y, en definitiva, la elaboración de mapas donde se muestre la densidad de insectos en todos los puntos de la parcela, se empleó el krigado ordi-

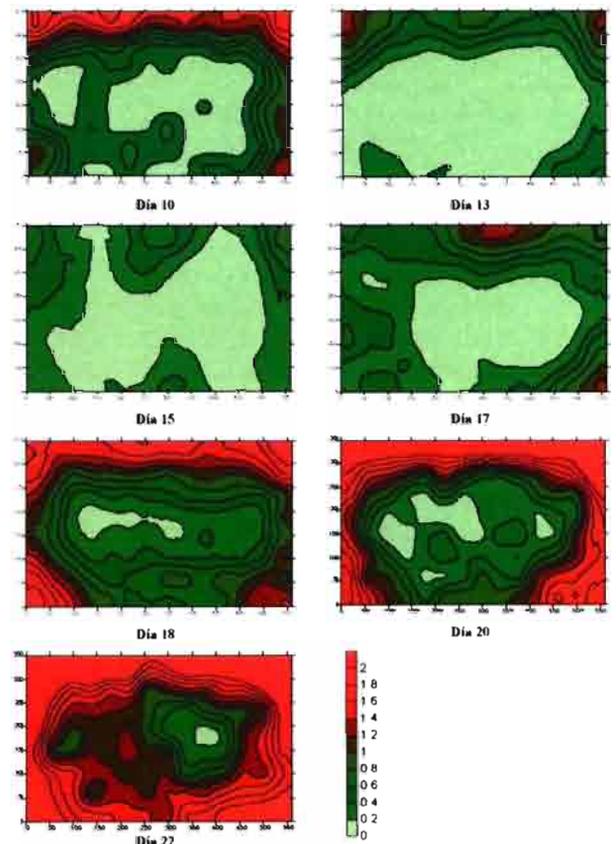
nario en bloques, considerando las estructuras de correlación espacial descritas con los variogramas. Los bloques se definieron como cuadrados de 5 m de lado.

Con ese método de estimación, se obtuvieron los mapas de distribución de las densidades de insectos en la parcela experimental para todos los días considerados en el estudio. En la **Figura 3** se muestran, a modo de ejemplo, algunos de ellos. Si se comparan las representaciones gráficas diarias, se puede analizar la evolución temporal de la población de insectos en la parcela. Con los mapas obtenidos se pudo comprobar como, en todos los casos, la distribución de los insectos mostraba un patrón común, con máximas densidades en las lindes de la parcela, dis-

minuyendo, de forma concéntrica, a medida que se avanza hacia el centro de la misma. Esto significa que los insectos se instalan en las primeras plantas que encuentran, colonizando las más próximas a las lindes y, cuando van llegando otras poblaciones, aumentando las densidades en los bordes de la parcela, se producen avances hacia el interior de la misma.

Con unas condiciones meteorológicas favorables para los insectos, en varios días podrían llegar a colonizar totalmente la parcela. Sin embargo, estas poblaciones son muy sensibles a los cambios de humedad y temperatura, por lo cual, cuando las condiciones son cambiantes, suele producirse una disminución de las densidades por mortalidad. Las

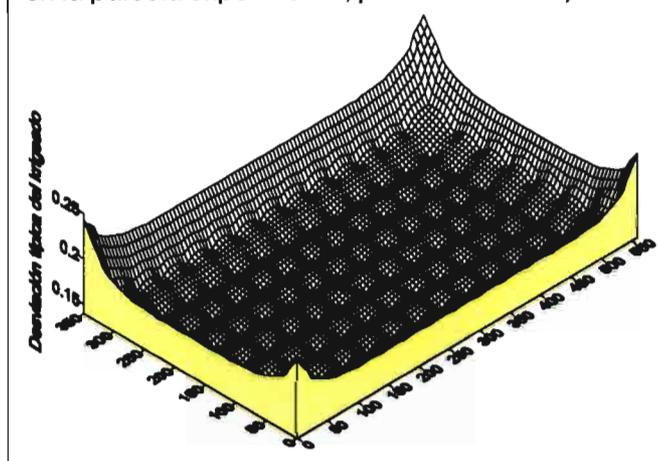
Figura 3. Mapas de distribución de *Helicoverpa armigera* Hb., para los días indicados, en la parcela experimental. La escala usada corresponde al logaritmo natural de la "densidad de insectos + 1".



nuevas poblaciones que lleguen a la parcela se instalarán en las plantas desocupadas de las lindes. Este proceso se repite constantemente durante la época de actividad migratoria del insecto. Obsérvese, en la **Figura 3**, como en el día 10 aparece en una de las lindes una alta densidad de insectos. Esa linde es el lugar donde incide el viento dominante en ese día (Arranz, 2002). En el día 12 de julio se registró una caída de la temperatura, por lo que las densidades de insectos eran mucho menores en el día 13. Sin embargo, entre los días 17 y 22 las temperaturas se mantuvieron constantes, dando lugar a una progresiva colonización de la parcela.

Para visualizar la bondad de las estimaciones en los diferentes lugares de la parcela experimental se puede representar la varianza o la desviación típica del error, en este caso del krigado ordinario en bloques, para el día 15 de julio. En el resto de los días, las distribuciones de las desviaciones típicas son equivalentes, variando sólo en las magnitudes de las mismas. Debido a que se tomaron muestras dispuestas regularmente en la parcela, en la mayor parte del área de estudio la desviación típica del krigado es muy reducida, aumentando notablemente en las cercanías de las lindes. Esto denota como las estimaciones son menos precisas en los límites de la parcela, ya que en esos lugares las interpola-

Figura 4. Distribución de la desviación típica del error, en la parcela experimental, para el día 15 de julio.



ciones en los puntos no muestrales se realizan con menos información, apoyadas sólo con datos muestrales en unas determinadas direcciones, mientras que las llevadas a cabo en las localizaciones más interiores, cada interpolación se realiza contando con la información aportada por puntos muestrales que rodean al lugar seleccionado.

Los mapas de distribución de las densidades de insectos son muy importantes para una correcta planificación en la lucha contra la plaga. Un tratamiento adecuado debe considerar que las densidades de insectos son mayores en las lindes, por lo que en esas zonas se debe actuar más intensamente. Además, con la realización de tratamientos preferenciales en los bordes de la parcela, se impide notablemente que los insectos se instalen y avancen al interior de la misma.

Desde el punto de vista medioambiental, la realización de tratamientos localizados o preferenciales implica una menor aplicación de sustancias potencialmente contaminantes sobre la parcela considerada, re-

duciendo el riesgo de contaminación de las aguas superficiales o de las subterráneas. También supone un ahorro para el agricultor, al consumirse una cantidad menor de productos y una necesidad menor en el uso de las máquinas agrícolas para la realización de los tratamientos.

CONCLUSIONES

Mediante el uso de la geoestadística se ha estudiado la distribución espacial de *Helicoverpa armigera* Hb. en una parcela de tomate, con el empleo de la función variograma, obteniéndose adicionalmente unas representaciones gráficas diarias de dichas distribuciones. Estos mapas se basan en la técnica de estimación geoestadística conocida como krigado, particularmente el krigado ordinario en bloques.

Con el ajuste de unos variogramas teóricos exponenciales o esféricos a los variogramas experimentales, en todos los días considerados, se ha puesto de manifiesto las oscilaciones locales que presenta la distribución de la densidad de insectos, confirmado ade-

más con el importante efecto pepita detectado. Los rangos de los variogramas oscilan entre 190 y 330 m, por lo que la dependencia espacial entre los datos abarcan, en muchos de los casos, o bien toda o bien la mayor parte de la parcela.

Con los mapas de distribución diaria de los insectos se detecta la concentración preferente de la plaga en las lindes de la parcela, avanzando al interior cuando las condiciones meteorológicas se mantienen estables permanentemente.

Los mapas contienen las mejores estimaciones en los puntos no muestrales, ya que se basan en unos datos que, después de una transformación logarítmica, se ajustaban a una distribución normal, suponiendo además que los variogramas elegidos describen lo más realmente posible la variabilidad espacial, si bien las precisiones de las estimaciones son mejores en el interior de la parcela que en las proximidades de las lindes, donde la desviación típica del error es más alta.

Los mapas de distribución de la densidad de insectos constituyen una herramienta imprescindible para la planificación de la lucha contra la plaga, indicando la necesidad de un tratamiento más intenso en las áreas próximas a las lindes.

El desarrollo de una agricultura más eficiente, con mayores beneficios para el agricultor y el medio ambiente, implica en última instancia la necesidad de conocer y aplicar correctamente las técnicas geoestadísticas.

El lector puede consultar la bibliografía empleada en: fjmorales@unex.es