

# Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales

F.J. Moral García

Dpto. de Expresión Gráfica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura. Avda. de Elvas, s/n., 06071 Badajoz, España

El objetivo de este artículo es mostrar como la geoestadística es una herramienta imprescindible cuando se desea analizar los patrones de distribución espacial de las variables ecológicas y medioambientales a partir de muestreos realizados en el área de interés. Asimismo, los procedimientos de estimación geoestadísticos, conocidos como "krigeado", permiten la realización de las "mejores interpolaciones" en aquellos lugares donde no se conoce la magnitud del atributo investigado. Con la información procedente de la estimación se puede realizar una serie de mapas sobre la distribución de la variable en el área experimental. Aunque la geoestadística ha supuesto una mejora considerable en la representación gráfica aplicada a la ecología y a las ciencias ambientales, para conseguir unos buenos resultados, es preciso conocer sus fundamentos y las asunciones sobre las que se basa. Como ejemplo de aplicación de la geoestadística se estudia la distribución de una plaga en una parcela experimental.

## Introducción

En la naturaleza, las variables físicas y biológicas muestran generalmente una importante heterogeneidad espacial. Ello no quiere decir que sea imposible encontrar un patrón de distribución. Al contrario, en la mayoría de los casos, existe una continuidad espacial entre las diferentes localizaciones. Un ejemplo es el caso de los trabajos relacionados con la ecología de los insectos. Aunque se pueden encontrar muchos estudios que tratan sobre 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 existía 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 (Taylor, 1984).

El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) y la aplicación de la geoestadística ha supuesto un nuevo impulso al análisis de la distribución espacial aplicada a la ecología y a las ciencias ambientales. Un SIG es un conjunto de programas informáticos que sirven para captar, almacenar, recuperar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos espaciales (Burrough y McDonnell, 1998). Los datos georreferenciados, es decir, con unas coordenadas conocidas con respecto a un origen predeterminado, pueden incorporarse a un SIG para generar mapas temáticos o coberturas. Por ejemplo, los tipos de suelo, las clases de cultivos o las densidades de insectos pueden mostrarse en unos mapas independientes. Además, los mapas temáticos pueden combinarse con el fin de analizar las posibles interacciones entre las diversas variables. Aunque los SIG han permitido a los investigadores la manipulación de datos espaciales, la caracterización y la modelización de los patrones de distribución espacial es muy poco factible si no se cuenta con un programa estadístico adecuado. La geoestadística es la herramienta fundamental para ese trabajo. En este trabajo, como ejemplo ilustrativo, se emplean técnicas geoestadísticas para el análisis de los patrones de distribución de una plaga en una parcela, mostrándose al final un conjunto de mapas elaborados mediante la aplicación de los métodos de interpolación geoestadísticos.

## Geoestadística

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:

1. *Análisis exploratorio de los datos.* 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 los erróneos e identificándose las distribuciones de las que provienen.
2. *Análisis estructural.* Estudio de la continuidad espacial de la variable. Se calcula el variograma, u otra función que explique la variabilidad espacial, y se ajusta al mismo un variograma teórico.
3. *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 forma de tendencias conocidas.

### Modelización de la variabilidad espacial

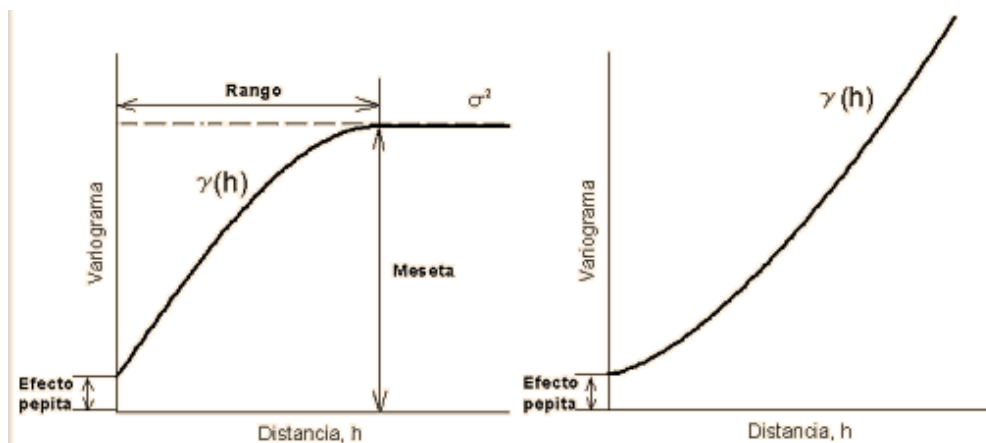
Sea  $Z(x)$  el valor de una variable en una localización  $x$  y  $Z(x+h)$  el valor de la misma variable en un punto distante  $h$  del anterior. En un caso bidimensional,  $x$  es el punto de coordenadas  $(x_1, x_2)$  y  $h$  es un vector con origen en dicho punto y módulo  $\frac{1}{2} h^{\frac{1}{2}}$ . Generalmente, serán muchos los puntos muestrales que disten  $h$  entre sí. Una forma de mostrar las similitudes o las diferencias entre los valores es mediante un gráfico en el que se representen los valores  $Z(x)$  frente a  $Z(x+h)$ , denominado gráfico de dispersión- $h$ . Si los valores son parecidos, la nube de puntos estará próxima a la bisectriz del primer cuadrante, existiendo una autocorrelación en esa variable. Habitualmente, con  $h$  reducidas, las nubes de puntos se disponen muy próximas a la bisectriz, aumentando la dispersión a medida que  $h$  se hace mayor. Esto coincide con la idea intuitiva de mayor parecido entre las muestras que estén más próximas entre sí.

Sin embargo, el uso de los gráficos de dispersión- $h$  es poco práctico, ya que se requerirían muchos para considerar todas las posibles distancias  $h$  y direcciones espaciales. Por tanto, es necesaria una herramienta que sea capaz de expresar esa información de una forma más resumida: el semivariograma, o simplemente variograma. A partir de los datos disponibles, se estima como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2$$

siendo  $Z(x_i)$  los valores muestrales en los puntos  $x_i$ , en los que se tienen datos tanto en  $x_i$  como en  $x_i+h$ ;  $N(h)$  es el número de pares de datos separados por una distancia  $h$ . En la práctica, se define un número finito de distancias,  $h_j$ , y se asignan al cálculo de  $g(h_j)$  todos los pares de valores contenidos en el intervalo  $(h_j - D h_j, h_j + D h_j)$ . De esa forma se obtiene el denominado variograma experimental, conocido también como variograma muestral o empírico.

Normalmente, el variograma es una función monótona creciente, alcanzando un valor límite, denominado meseta, equivalente a la varianza muestral. La meseta se alcanza para un valor de  $h$  conocido como rango o alcance (**Fig. 1**). El rango determina la zona de influencia en torno a un punto, más allá del cual la autocorrelación es nula. Sin embargo, no todos los variogramas alcanzan una meseta. Es posible que un variograma no tienda asintóticamente a la varianza, sino que tienda a infinito cuando así lo haga  $h$  (**Fig. 1**). El variograma representa la tasa media de cambio de una propiedad con la distancia. El hecho de que dos observaciones próximas sean más parecidas que si estuvieran más separadas se refleja en el mismo concepto del variograma. La dependencia espacial disminuye a medida que se incrementa la distancia,  $h$ , y finaliza a una cierta distancia, el rango. Más allá del rango, la tasa media de cambio es independiente de la separación entre las observaciones.



**Figura 1.** Variogramas con meseta (izquierda) y sin meseta (derecha).

Por definición,  $g(0) = 0$ . Pero, con frecuencia,  $g(0)$  muestra un valor positivo, dando lugar al denominado efecto pepita (Fig. 1). Éste se debe a la variabilidad a una distancia más pequeña que el menor  $h$  considerado. Por ejemplo, si una población de insectos se encuentra agregada en las hojas de los árboles y los datos muestrales se refieren a un conjunto de árboles como unidad, entonces la variabilidad espacial no será detectada y se tendrá un importante efecto pepita. En ocasiones también es fruto de los errores experimentales o de muestreo.

Si los variogramas tienden a la horizontalidad, con valores próximos a la varianza muestral, ello indica la ausencia de una estructura espacial. Este sería el caso de una población de insectos distribuidos aleatoriamente. La varianza muestral representa la variabilidad de los datos cuando ocurre esta circunstancia. A estos variogramas se les conoce como efecto pepita puro. No obstante, las variables ambientales pueden mostrar diferencias en los patrones de distribución espacial en función de la dirección considerada. Por ejemplo, en una población de insectos, la densidad de los mismos será mayor en la dirección coincidente con la de migración de los mismos. Cuando el patrón de variabilidad espacial cambia con la dirección existe anisotropía. En estos casos se deben emplear variogramas que dependan no sólo de  $h$ , sino también de la dirección (Isaaks y Srivastava, 1989).

Para la determinación del variograma experimental o empírico deben cumplirse una serie de etapas. En Goovaerts (1997) o Isaaks y Srivastava (1989) puede consultarse de forma detallada el proceso. En cualquier trabajo es necesario el cumplimiento de un par de principios que condicionan la aplicación de la geoestadística. 1) El número de observaciones o puntos muestrales requeridos para estimar un variograma debe estar alrededor de 100 en condiciones de isotropía; si existe anisotropía los datos tienen que ser mucho más abundantes. 2) El número de pares de datos que se requiere para el cálculo de cada punto del variograma debe ser al menos de 30-50.

Además del variograma como herramienta geoestadística para la descripción de la variabilidad espacial, se puede usar alternativamente la función de correlación (correlograma) o la función de covarianza, ya que las tres están relacionadas siempre que se disponga de un variograma con meseta (Isaaks y Srivastava, 1989; Moral, 2003).

Una vez que se han definido los puntos del variograma experimental, será necesario ajustar un modelo a dichos puntos, denominado variograma teórico, debido a la imposibilidad de trabajar con un variograma como el experimental, carente de una función matemática precisa. Los modelos básicos más usados son los denominados esférico, exponencial, gaussiano, potencial, lineal y el efecto pepita puro, pudiéndose combinar linealmente. Sus formas y expresiones matemáticas pueden consultarse en Isaaks y Srivastava (1989) y Moral (2003). Cuando se realiza la modelización del variograma teórico, el usuario puede proponer diversos modelos que se ajusten a los datos muestrales. La elección de un modelo concreto suele basarse en apreciaciones subjetivas bien documentadas y en la experiencia. Existen también una serie de criterios estadísticos (Cressie, 1985) que pueden ayudar a dicha elección, como los proporcionados, por ejemplo, en los programas VARIOWIN, GS+, GSTAT o SURFER. En la dirección <http://www.ai-geostat.org> puede consultarse detalladamente, entre otros, los programas mencionados. Conviene señalar que el objetivo no es lograr el mejor ajuste de una función a una serie de puntos; se debe seleccionar el modelo que mejor explique el patrón de variabilidad espacial de la variable investigada, aunque éste no sea el mejor desde un punto de vista estadístico. Cuando el modelo ha sido identificado, se dice que el variograma ha sido calibrado o validado.

Si se tienen dos variables relacionadas, pueden definirse los variogramas cruzados (también los correlogramas y las funciones de covarianza cruzadas). Su tratamiento es igual al descrito con anterioridad para el variograma (Moral, 2003). Un ejemplo podría ser el análisis de la distribución de una población de insectos considerando el contenido de humedad en el suelo, suponiendo que la especie tratada se correlaciona con la humedad superficial.

### La estimación geoestadística: el *krigeado*

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., son las siguientes. 1) Mientras que los métodos tradicionales utilizan el concepto euclidiano de la distancia para el cálculo de los pesos que se aplicarán a cada dato muestral, el *krigeado* considera tanto la distancia como la geometría de la localización de las muestras. 2) Mediante el *krigeado* se minimiza la varianza del error esperado (diferencia entre el valor real y el estimado). Como el valor real en un punto no muestral es desconocido, el *krigeado* emplea un modelo conceptual con una función aleatoria asociada a los valores reales. 3) Los métodos geoestadísticos muestran una gran flexibilidad para la interpolación, pudiéndose estimar valores puntuales o en bloques, así como métodos para incorporar información secundaria que esté relacionada con la variable principal. Todos estos métodos dan lugar a unas superficies muy suaves, además de una estimación de la varianza en todos los puntos, lo cual no puede realizarse con otros métodos de interpolación.

La idea fundamental del *krigeado* es consecuencia de los conceptos relacionados con la dependencia espacial, tratados en el apartado anterior: 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 generalmente se distribuyen de una forma continua. Todos los estimadores del tipo *krigeaje* no son sino variantes del estimador lineal básico  $\boxed{|\times|}$ , definido como:

$$Z^*(\mathbf{x}) - m(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \omega_i [Z(\mathbf{x}_i) - m(\mathbf{x}_i)]$$

donde  $w_i$  son los pesos asignados a los datos  $z(x_i)$ , siendo éstos observaciones de la variable aleatoria  $Z(x_i)$ . Los valores esperados de las variables aleatorias  $Z(x)$  y  $Z(x_i)$  son  $m(x)$  y  $m(x_i)$  respectivamente. El número de datos,  $n$ , considerado en la estimación, varía de un lugar a otro. En la práctica se emplean los datos existentes en las proximidades del punto a estimar, dentro de un entorno definido al principio.

Todos los tipos de *krigeado* comparten el objetivo de minimizar la varianza del error (o de la estimación)  $\boxed{|\times|}$ , con la restricción de ser un estimador no sesgado, o sea:

$$\sigma_E^2(\mathbf{x}) = \text{Var}[Z^*(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x})] \rightarrow \text{Mínimo}$$

con la restricción,

$$E[Z^*(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x})] = 0$$

Las distintas clases de *krigeado* varían en función del modelo adoptado para la función aleatoria  $Z(x)$  (Goovaerts, 1997). El más usado es el denominado *krigeado* ordinario. Se caracteriza por considerar que se producen fluctuaciones locales de la media, limitando el dominio de estacionariedad de la misma a un ámbito local:  $m(x) = \text{constante}$ , pero desconocida. Cuando las estimaciones realizadas se asocian a un punto, se tiene el *krigeado* puntual ordinario.

En diversos casos se requiere una estimación del valor medio de una variable dentro de una superficie o un volumen de cualquier forma o tamaño (bloque). En el ejemplo propuesto en el siguiente apartado, donde se asocia un valor puntual (un número de insectos) a una superficie determinada, parece lógico que cada estimación efectuada se asocie asimismo a un bloque. Por esta razón, se utilizó el *krigeado* ordinario en bloques (KOB). El estimador en bloques tiene la forma:

$$Z_{\text{KOB}}^*(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z(\mathbf{x}_i)$$

siendo  $w_i$  los pesos para el *krigeado* en bloques que se asignan a los datos  $Z(x_i)$ .

Considerando que el estimador debe ser no sesgado y que minimize el error de la varianza, se llega al sistema de ecuaciones del KOB, cuya resolución da lugar a los pesos  $w_i$  (Goovaerts, 1997).

En muchas ocasiones, los fenómenos naturales son multivariantes, siendo además difícil la obtención de muestras de la variable principal (la que es objeto de estudio), o puede ser cara o requerir mucho tiempo. El método de interpolación geoestadística conocido como *cokrigeado* permite considerar una serie de información secundaria, referente a otros atributos relacionados con el principal. Cuando los datos muestrales son escasos o están muy poco correlacionados en el espacio, la estimación mejora sustancialmente cuando se incorpora esa información adicional. El *cokrigeado* es sólo una modificación del *krigeado*. La variable principal se estima en un punto mediante una combinación lineal de los datos obtenidos en distintos lugares para las variables principal y secundaria (una o varias). Una mayor información sobre el *krigeado* y el *cokrigeado* puede obtenerse en Goovaerts (1997) y en Moral (2003).

## Ejemplo propuesto. Materiales y métodos

Se desea analizar la distribución espacial de una plaga de *Helicoverpa armigera* Hb. durante una serie de días.

La parcela experimental sobre la cual se realizó el estudio se encuentra en el suroeste del término municipal de Badajoz, en la finca Benavides. Su forma es 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 superpuesta sobre la misma. De esa forma, sobre el terreno se determinaron una serie de puntos equidistantes 43 m, según el lado menor de la parcela, y 40 m en el lado mayor, dando lugar a 112 puntos muestrales, referenciados sobre un origen de coordenadas previamente establecido en uno de los vértices de la parcela. Mediante trampas dispuestas en cada uno de los puntos muestrales, se efectuaron conteos diarios de los insectos capturados 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 correspondientes a las capturas para los días comprendidos entre el 10 y el 22 de julio de 2002, antes de la recolección del fruto.

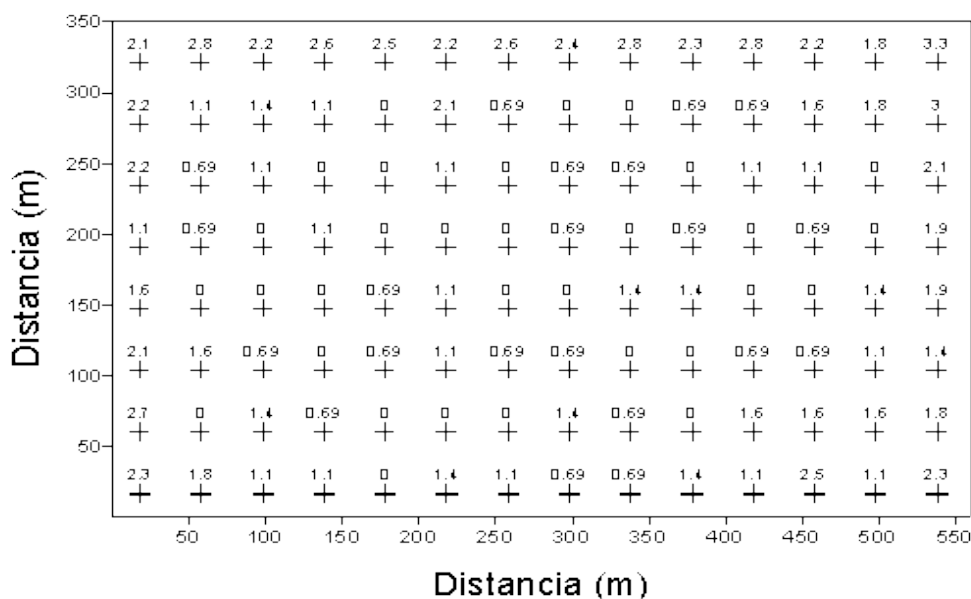
Para llevar a cabo los análisis geoestadísticos se dispuso del programa SURFER. La base de datos disponible consta de las coordenadas de las 112 trampas y del número de insectos capturados en ellas, para cada uno de los días de muestreo. Los datos se expresaron como número de insectos por superficie representativa de cada muestra, equivalente a las dimensiones de las celdas de la retícula superpuesta sobre la parcela, debido a la uniformidad del muestreo.

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. Se tuvo en cuenta, además, que en el variograma experimental se definirían 7 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).

## Resultados y discusión

Durante la primera etapa del estudio geoestadístico, el análisis exploratorio, se realizó una transformación logarítmica de los datos, para que éstos mostraran una mayor normalidad, confirmado mediante el cálculo de los estadísticos asociados a cada distribución (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 (Isaaks y Srivastava, 1989; Moral, 2003), es especialmente útil el denominado mapa de posicionamiento de las observaciones (**Fig. 2**). 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.

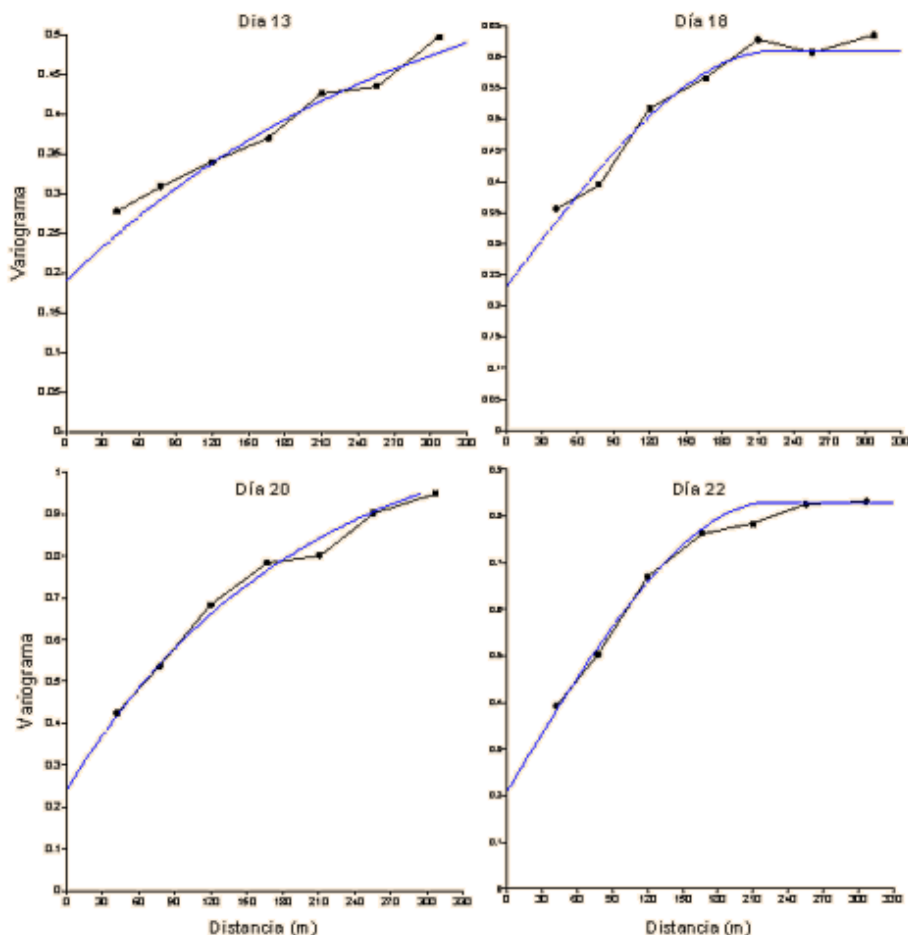


**Figura 2.** Mapa de posicionamiento de las observaciones en la parcela experimental. Se incluye el valor de la variable (logaritmo de la 'densidad de insectos +1', para el día 20 de julio de 2002) en cada punto muestral.

En la fase del análisis estructural de los datos se construyeron los variogramas omnidireccionales para cada uno de los días y, con posterioridad, se les ajustaron unos modelos teóricos. En ningún caso se consideró la existencia de anisotropía ya que, con el número de datos disponibles, el cálculo de los variogramas direccionales se hubiesen sustentado sobre muy pocos puntos muestrales, con unos resultados que hubieran sido muy deficientes. Dado que la parcela experimental no lindaba con otras donde hubiera plantaciones de tomate, no es posible la existencia de migraciones de insectos entre parcelas adyacentes, aunque *Helicoverpa armigera* Hb. puede desplazarse 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. En la **Figura 3** 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).

**Tabla 1.** Variogramas teóricos ajustados a los diferentes variogramas experimentales. (Exp = Exponencial, Esf = Esférico)

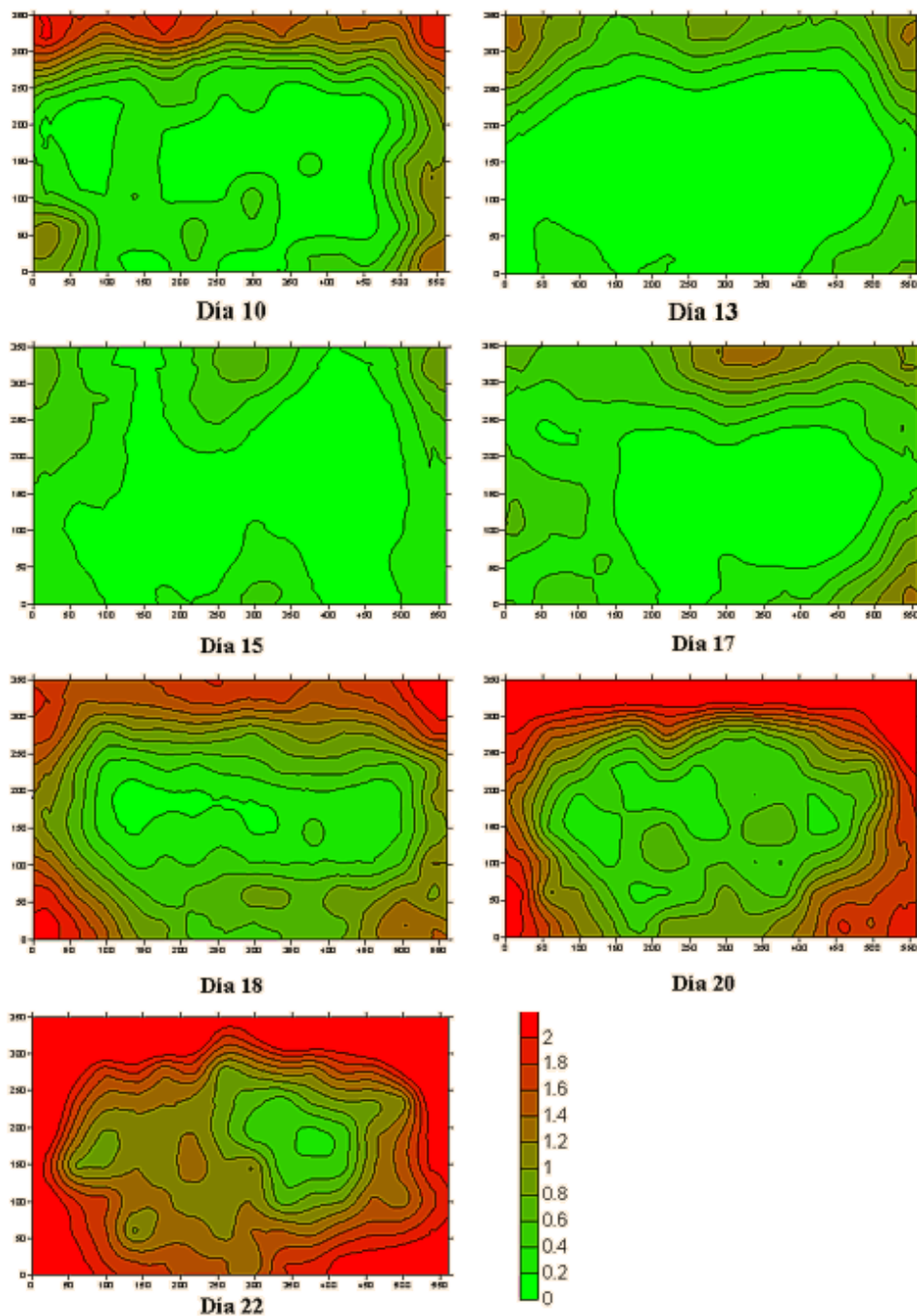
Día	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Modelo	Exp	Exp	Esf	Exp	Esf	Exp	Exp	Esf	Esf	Esf	Exp	Exp	Esf
Rango	300	300	330	300	315	250	275	300	225	275	190	200	225
Meseta	0,67	0,25	0,30	0,45	0,16	0,15	0,10	0,18	0,38	0,95	0,90	0,55	0,62
Pepita	0,12	0,12	0,15	0,19	0,07	0,09	0,08	0,12	0,23	0,15	0,24	0,18	0,21



**Figura 3.** Variogramas experimentales (puntos y línea negra) y teóricos (línea azul) para los días indicados.

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. En una variable tan errática a pequeñas distancias como es el número de insectos esto es lógico, debido a la variabilidad que existe a una distancia menor que la abarcada por cada retícula asignada a cada dato muestral. La caracterización de la distancia hasta la cual existe dependencia espacial en la densidad de insectos, el rango o alcance, varía entre 190 y 330 m, la distancia máxima, abarcando la totalidad de la parcela.

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 *krigeado* ordinario en bloques, considerándose las estructuras de correlación espacial descritas con los variogramas. Los bloques se definieron como cuadrados de 5 m de lado. Así 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 4** se muestran 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 se pudo comprobar que la distribución de los insectos mostraba un patrón común, con máximas densidades en las lindes de la parcela, disminuyendo 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 más individuos, aumentando las densidades en los bordes de la parcela, se producen avances hacia el interior de la misma.



**Figura 4.** 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'.

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 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 4**, 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). 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 KOB, para la variable de interés. En la **Figura 5** se muestra, como ejemplo, la representación de la desviación típica del KOB 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 *krigeado* 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 interpolaciones 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. Para minimizar el efecto de la imprecisión en los bordes, las trampas más cercanas a las lindes de la parcela se instalaron unos metros hacia en interior de la misma (ver **Fig. 2**), para que éstas estuvieran totalmente rodeadas de varias filas de plantas de tomate.

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 hacia el interior de la misma. Desde el punto de vista ambiental, la realización de tratamientos localizados o preferenciales implica una menor aplicación de sustancias potencialmente contaminantes sobre la parcela considerada, reduciendo el riesgo de polución de las aguas superficiales y de las subterráneas.

## Conclusiones

Mediante el uso de la geoestadística se ha estudiado la distribución espacial del insecto *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 *krigeado*, particularmente el *krigeado* ordinario en bloques.

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. 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. No obstante 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.

Con el ejemplo se ilustra como la geoestadística constituye una herramienta muy útil en el estudio de las distribuciones espaciales de las variables naturales, lo cual es esencial cuando se deben tomar decisiones que afectan al medio ambiente. Aparte de las ventajas del *krigeado* con respecto a otros métodos de interpolación más sencillos, mediante los procedimientos geoestadísticos se conoce la bondad de la estimación en toda el área de estudio, información no disponible con otros métodos que pueden dar lugar a estimaciones semejantes, pero carentes de las propiedades inherentes al *krigeado*.

## Referencias

- Arranz, A.M. 2002. *Estudio Geoestadístico de la Distribución Espacial de la Helicoverpa armigera Hb. en el cultivo del tomate en las vegas bajas del Guadiana*. Trabajo fin de carrera., Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura, Badajoz.
- Burrough, P.A., y McDonnell, R.A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford Univ. Press, New York, USA.
- Cressie, N.1985. Fitting variogram models by weighted least squares. *Mathematical Geology* 17:563-586.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford Univ. Press, New York, USA.
- Isaaks, E.H., y Srivastava, R.M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford Univ. Press, New York, USA.
- Moral, F.J. 2003. *La Representación Gráfica de las Variables Regionalizadas. Geoestadística lineal*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Extremadura, Badajoz, España
- Taylor, L.R. 1984. Assessing and interpreting the spatial distributions of insect populations. *Annual Review of Entomology* 29: 321-357.