

# Elaboración de modelos de elevación digital empleando técnicas geoestadísticas y sistemas de información geográfica

## Using geostatistics and G.I.S., for DTM's assessment

CACHEIRO POSE, M., VALCARCEL ARMESTO, M., VIEIRA, S. R.,  
TABOADA CASTRO, M. T.

The main objective of this study was to examine topographical information by means of geostatistical techniques. Moreover, the spatial dependence of point measurements was used in order to assist in making digital elevation models (DEM's).

The survey was conducted in cultivated land. Topographical data were measured for two different fields which size is 2.24 Ha and 0.62 Ha using an Abney level.

The continuity of the spatial distribution of point measurements has been evaluated using geostatistics. The analysed data sets showed a lineal trend. After removing the trend experimental semivariograms were calculated and scaled by dividing each of them by the value of their respective variances. Variogram models with small nugget effect and a spatial component described well the residual data resulting from trend removing. The curve fitting technique used to adjust models was jack-knifing. Effects of sampling density during data collection was critically evaluated.

Once topographical data were estimated on a fine grid through kriging, contour maps were obtained and subsequently transported to the GIS. The methodology used to expand information from point to landscape with the geostatistical techniques has proved itself very useful.

**KEY WORDS:** Geostatistics, Kriging, GIS, DTM.

CACHEIRO POSE, M.; TABOADA CASTRO, M. T., (Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira. 15071. A Coruña) VALCARCEL ARMESTO, M.(Escuela Politécnica Superior. Universidad de Santiago de Compostela. Avda. de Madrid s/n. 27002. Lugo), VIEIRA, S. R.(Seção de Conservação do Solo. Instituto Agrônômico. Caixa postal 28-13001-970, Campinas-SP. Brasil).

## INTRODUCCION

Los modelos digitales del terreno (MDT) constituyen una línea de investigación concreta dentro de la cartografía del terreno. El modelo básico y más conocido es el modelo digital de elevaciones (MED), aunque la característica a representar puede ser diferente de la altitud. Por lo tanto esta metodología presenta interés en cualquier disciplina que se ocupe del análisis territorial, como la geomorfología, la hidrología, la edafología, la climatología, etc., constituyendo una valiosa herramienta informática para el análisis de la variabilidad espacial en las Ciencias de la Tierra.

La altitud puede medirse directamente, mediante estaciones topográficas, empleando GPS o con altímetros aerotransportados. Los métodos directos son más precisos, pero por razones de accesibilidad y rapidez se utilizan muchas veces como un sistema de apoyo, y los datos de altitud se obtienen con frecuencia a través de métodos indirectos. Dentro de los métodos indirectos, la opción más extendida es la digitalización de mapas topográficos preexistentes, aunque existen otras opciones como la restitución fotogramétrica a partir de fotografías aéreas, de utilización limitada, debido a su coste.

Los campos más adecuados para la aplicación de los MEDs son aquellos en donde la topografía del terreno juega un papel determinante. Estos modelos permiten en primer lugar la descripción y cuantificación de las características morfológicas del terreno y constituyen el punto de partida de análisis de riesgos naturales y de estu-

dios ambientales. Cuando se ha efectuado un muestreo suficientemente denso, se han puesto en evidencia las posibilidades para una descripción cuantitativa de las relaciones suelo-geomorfología.

En hidrología, a partir de las definiciones de línea de flujo y área tributaria se pueden delimitar automáticamente cuencas hidrográficas, modelizar caudales máximos o efectuar un análisis temporal de los mismos a partir de MEDs. También son útiles en el proceso de modelización de la escorrentía y los riesgos de erosión.

Son numerosas las aplicaciones encontradas en climatología, entre las que cabe citar el análisis de la variación de precipitación y temperatura en función de la altitud y localización o la construcción de modelos de insolación, radiación solar, evaporación y evapotranspiración.

A partir de los MEDs y modelos derivados es posible también realizar clasificaciones. Se trata de un proceso de síntesis, en el que se pierde mucha información, pero que facilita el análisis.

Los MED se encuentran en pleno desarrollo y aún quedan problemas por solventar, principalmente la estructura idónea de los datos de entrada y la interpolación de las medidas experimentales, buscando un compromiso entre exactitud, resolución espacial y facilidad de operación. Para tratar la elevación del terreno, ha sido diseñada especialmente una estructura denominada TIN (Triangulated Irregular Network) que permite tratar e interpolar valores distribuidos irregularmente, por lo que se considera una estructura de tipo vectorial, que codifica eficientemente la topología. Sin embargo, las estructuras en que los valores se distribuyen regularmen-

te, tipo raster, aunque menos compacta, presenta ventajas como la eficiencia en el tratamiento de imágenes digitales y su mayor versatilidad para la integración en un sistema de información geográfico (SIG).

Diversos autores (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; SAMPER & CARRERA, 1990; PAPRITZ & WEBSTER, 1995) admiten que las principales ventajas de la geoestadística frente a otros métodos de interpolación son: 1) las estimas obtenidas no tienen sesgo; 2) es un método exacto, es decir, el valor estimado coincide con el muestral en los puntos de interpolación; 3) permite determinar la precisión de las estimas y 4) los errores de estimación son minimizados. En comparación con otras técnicas de interpolación la geoestadística presenta requerimientos altos de cálculo; por otra parte, el análisis mediante este método de la dependencia espacial de una variable del medio físico puede verse limitado cuando la toma de datos intensivos de la misma no es posible o presenta limitaciones.

En este trabajo se presenta una metodología para elaborar un MED de elevada resolución espacial, a partir de la información de alta calidad, obtenida directamente mediante una estación topográfica. El método utilizado combina el uso de un SIG, tipo raster, y la interpolación espacial mediante herramientas geoestadísticas. Se presentan los resultados obtenidos para dos parcelas de cultivo, consideradas por sus dimensiones representativas para muchas comarcas de la Comunidad Autónoma de

Galicia, en las que se registraron importantes episodios erosivos.

## MATERIAL Y METODOS

Se estudiaron dos parcelas situadas en el Centro de Investigaciones Agrarias de San Tirso de Mabegondo, Abegondo, A Coruña, de 2,24 Ha (parcela 1) y 0,62 Ha (parcela 2) de extensión.

Los datos topográficos se obtuvieron con una estación total (Sokkia SET5A), siendo éstos del tipo x,y,z. En la parcela 1 la densidad de muestreo fue de 930 puntos/Ha, y en la parcela 2 de 908 puntos/Ha. El levantamiento se efectuó en un momento en que las dos parcelas presentaban surcos de erosión, cuyo microrrelieve también forma parte de la base de datos.

### Análisis geoestadístico

Para el análisis de la variabilidad espacial de los datos obtenidos con la estación total, se utilizaron técnicas de geoestadística descritas en VIEIRA *et al.*, (1983).

El primer paso para el análisis geoestadístico consiste en verificar si el sistema de muestreo utilizado ha permitido o no poner en evidencia la existencia de dependencia espacial. Para ello se estima el semivariograma experimental,  $\gamma(h)$ , mediante la ecuación:

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

en donde  $N(h)$  representa el número de pares de valores medidos  $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$  separados por un vector  $h$ . Los valores de  $x_i$  e  $x_i+h$  son definidos de acuerdo con las

posiciones de los datos muestrales. Dependencia espacial, significa, en otras palabras, autocorrelación, es decir, la dependencia del valor de una variable en un punto del de sus vecinos. Esta característica está expresada en la ecuación (1) como la diferencia  $\{Z(x_i)-Z(x_i+h)\}$ . Asumiendo que la variación es independiente de la dirección, se puede utilizar en los cálculos el módulo del vector  $\mathbf{h}$ , que equivale a la distancia de separación entre muestras.

Una vez calculado el semivariograma se dispone de pares de valores de semivarianza  $\gamma^*(h)$  y de distancias,  $h$ , que se representan gráficamente tomando como ordenadas los valores de la semivarianza y como abscisas las distancias. Al ajustar una ecuación a este gráfico se obtiene un modelo de dependencia espacial o semivariograma teórico. Para propiedades que presentan dependencia espacial se espera que la diferencia entre los valores  $\{Z(x_i)-Z(x_i+h)\}$  crezca con la distancia hasta un punto determinado, a partir del cual se estabiliza, con un valor denominado meseta, representado por el símbolo  $C_0+C_1$ , aproximadamente igual a la varianza de los datos. Esta distancia recibe el nombre de alcance,  $a$ , y representa el radio de un círculo, dentro del cual los valores de la propiedad estudiada son tan similares unos con otros que están correlacionados. El valor de la semivarianza en la intersección del eje de ordenadas se denomina efecto pepita; su símbolo es  $C_0$ , y representa la variabilidad de la propiedad estudiada para distancias inferiores a la que separa muestras vecinas. Así, cuanto mayor es el efecto pepita, menor es la dependencia

espacial de una propiedad. Los parámetros efecto pepita ( $C_0$ ), meseta ( $C_0+C_1$ ) y alcance,  $a$  se usan en las ecuaciones que describen mediante modelos teóricos los semivariogramas; este procedimiento se discute ampliamente por VIEIRA *et al.*, (1983).

Existen diversos modelos de semivariograma: lineal, esférico, exponencial... En este trabajo los datos experimentales de topografía se ajustaron a un modelo gaussiano, cuya expresión es :

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right] \quad (2)$$

Los fenómenos representados por este modelo son continuos en todos los puntos y derivables en su mayoría, es decir, fenómenos con oscilaciones suaves y mayor grado de estructura espacial que en otros modelos.

Si existiese dependencia espacial, significa que los valores vecinos son tan semejantes entre sí, que es posible estimar valores en cualquier punto en que la propiedad no fue medida usando el modelo de dependencia teórico. El valor estimado en una posición,  $x_0$ , se obtiene mediante :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

en donde,  $Z(x_i)$  es el valor medio en la posición,  $x_i$ ;  $\lambda_i$  son los pesos relativos de cada valor medido, y  $n$  es el número de valores medidos usados para estimar el valor  $Z^*(x_0)$ .

Las características más importantes que se exigen a un método de interpolación son que los valores estimados no estén sesgados, que las diferencias medias entre éstos y los valores medidos sean nulas o

muy próximas a cero y que la varianza de estimación de los valores medios sea mínima. Al imponer estas condiciones en la

$$\begin{pmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \dots & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_n \\ \mu \end{pmatrix} \quad (4)$$

ecuación (2) se obtiene un sistema de ecuaciones, conocido como ecuaciones de krigado:

en donde  $\gamma(x_i, x_j)$  es la semivarianza estimada usando el modelo teórico de semivariograma ajustado a los valores experimentales, que corresponde a la distancia entre los puntos localizados en la posición  $x_i$  y  $x_j$  y  $\gamma(x_i, x_0)$  es la semivarianza correspondiente a la distancia entre los puntos localizados en la posición  $x_i$  y  $x_0$ . La solución del sistema de ecuaciones de krigado (4) genera N valores de pesos  $l_i$  y un valor del multiplicador de Lagrange,  $m$ , asociado al proceso de minimización de la varianza. Sustituyendo los valores de los pesos,  $l_i$ , en la ecuación (3) es posible estimar los valores en cualquier posición,  $x_0$ , del espacio muestreado. La utilización de los valores insesgados y con varianza mínima, obtenidos por krigado permite construir mapas de isolíneas o mapas tridimensionales para el examen y la interpretación de la variabilidad.

*Identificación y filtrado de una tendencia*

En ciertos casos, las variables regionali-

zadas no presentan estacionalidad, y en consecuencia el semivariograma no alcanza una meseta estable. En estas circunstancias, a veces, se puede identificar una tendencia y descomponer la variable en dos componentes:

$$Z(x) = m(x) + R(x) \quad (5)$$

donde  $m(x)$  es la tendencia o deriva y  $R(x)$  es el residuo. La tendencia dependerá exclusivamente de la posición del punto, con lo cual la componente aleatoria queda plasmada mediante el residuo.

La variable regionalizada en este caso es una función de dos variables, y la tendencia tendrá que ser fijada con el fin de restarla a la variable inicial y así obtener el residuo,  $R(x)$ .

La expresión utilizada en este trabajo para filtrar la tendencia fue la lineal:

$$m(x, y) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3xy \quad (6)$$

Lógicamente, se pueden usar otras expresiones, sobre todo cuando existe un buen conocimiento del fenómeno a estudiar; en este caso también se utilizó un filtrado parabólico y cúbico, obteniéndose peores resultados.

En general, la elección del modelo de tendencia a filtrar se lleva a cabo ajustando por mínimos cuadrados cada uno de los modelos considerados y eligiendo aquel que proporcione una correlación más alta. Además, el semivariograma de los residuos debe mostrar una estructura espacial más fuerte que cuando no se considera tendencia. El siguiente paso consiste en restar a la medida efectuada en cada punto su tendencia, para obtener los residuos. Con los

residuos se efectúa posteriormente el tratamiento usual (cálculo del semivariograma, ajuste, krigado, etc.).

Para obtener, finalmente, el mapa de las estimaciones, es necesario sumar o restar la deriva a los datos de krigado, es decir:

$$Z^*(x,y) = m(x,y) + R^*(x,y) \quad (7)$$

donde  $R^*(x,y)$  es la estimación del residuo resultante del krigado.

#### *Escalamiento del semivariograma*

Para comparar semivariogramas de diferentes propiedades se pueden referir a la misma escala dividiendo cada uno de los valores por la varianza de los datos muestrales. De este modo la meseta de los diferentes semivariogramas tiende a 1,0 y todos pueden ser representados en el mismo gráfico. Toda vez que un semivariograma describe la variabilidad espacial de los datos, la proximidad entre unos y otros, cuando se refieren a una escala común, indica la similitud del modo en que las propiedades estudiadas varían espacialmente.

#### *Jack-knifing*

El Jack-knifing es un método de validación del ajuste del semivariograma basado en la eliminación de cada punto muestral y en su posterior estimación por krigado a partir de los puntos muestrales vecinos. Lo original de este método es que la anterior estimación se hace con varias posibilidades en cuanto al número de vecinos utilizado (para este caso particular:

4,8,12,16,20 y 24 vecinos), y posteriormente se estudia cual de esos números hace mínimos unos parámetros estadísticos de testado. Así el método del Jack-knifing no sólo informa de la bondad del ajuste del semivariograma sino que también ayuda a elegir el número óptimo de vecinos a usar en el krigado. Los criterios de testado a estudiar serán: pendiente de la recta de regresión, coeficiente de correlación, media y varianza de los errores absolutos, media y varianza de los errores relativos.

#### **Construcción de un modelo de elevación digital (MED) mediante sistemas de información geográfica (SIG)**

La compatibilización e incorporación de datos cuantitativos a los sistemas de información geográfica (SIG), que parten de la información proporcionada por cartografías temáticas, permite construir bases de datos georeferenciadas con enormes posibilidades para el tratamiento de la variabilidad espacial. Mediante un SIG puede abordarse una modelización descriptiva y también pueden elaborarse modelos predictivos. (TOMLIN, 1990).

Hay dos aproximaciones fundamentales a la representación del componente espacial de la información geográfica: el modelo vectorial y el raster (ARONOFF, 1989). En el modelo vectorial los objetos y las condiciones del mundo real son representados por los puntos y líneas que definen sus límites, como si estuvieran siendo dibujados en un mapa.

En el modelo ráster el espacio está regularmente subdividido en celdas (gene-

ralmente de forma cuadrada). Cuanto más densa sea la malla mayor resolución tendrá, más información se tratará y mejor será la exactitud de la variable a representar, en este caso la altitud. La localización de objetos o condiciones geográficas está definida por la posición de las celdas en la fila y la columna que ocupan. Actualmente, comienzan a reconocerse las ventajas de los denominados SIG ráster sobre los vectoriales a la hora de modelizar la variabilidad espacial de los sistemas naturales (BURROUGH, 1993).

La unidad básica de información del MED es un valor de altitud ( $z$ ), junto con sus coordenadas ( $x,y$ ). Las interrelaciones entre estas unidades elementales pueden representarse de varias formas. Las estructuras de datos más usadas son de tipo ráster, concretamente las matrices regulares y las TIN (triangulated irregular network).

En general, la descripción vectorial es más adecuada para variables discretas y la estructura ráster se adapta mejor a la representación espacial de variables continuas. No obstante, aunque los SIG tienden a adoptar estructuras vectoriales, el tratamiento de los datos topográficos y otras variables continuas sigue haciéndose en formato matricial. El SIG utilizado en el presente trabajo es el PCRaster (VAN DEURSEN & WESSELING, 1995).

La secuencia básica del análisis de los datos para los mapas topográficos resultantes de la interpolación del krigado hecha mediante el SIG incluye, una vez obtenido el semivariograma teórico, los siguientes pasos:

—Creación de un mapa base sobre el que se insertará el MED. En este mapa se

define el tamaño de la celdilla que contendrá la información, y el contorno de la parcela.

—Con los datos residuales, y con el semivariograma teórico realizamos un krigado en bloques, obteniendo así un MED de los residuos.

—A continuación se adiciona la tendencia, obteniendo así el MED de las parcelas.

—Se visualiza el modelo en ráster y se elabora la leyenda apropiada del mapa, en el modo de anotación de salida.

—Finalmente impresión del mapa con la leyenda correspondiente.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Se puso de manifiesto una importante autocorrelación entre pares de puntos vecinos, medidos con el equipo topográfico. Debido al relieve de las parcelas, en pendiente más o menos acusada, previo al estudio del semivariograma, se llevó a cabo una retirada de la tendencia de las cotas. Se ensayaron tres funciones diferentes: lineal, parabólica y cúbica, observándose unos mejores resultados con la función lineal.

Se calculó el semivariograma de los residuos. Para asegurar que el comportamiento del semivariograma no es debido a la variación en el número de pares, (a partir de cierta distancia se aprecia un descenso en el número de pares que interviene en el cálculo de cada intervalo del semivariograma) se ha elegido como distancia máxima de comparación aquella, a partir de la cual, este número desciende de forma brusca. En este caso se usan 120 m en la parcela 1 y 70 m en la 2.

Se aprecia una fuerte dependencia espacial en los semivariogramas (figura 1), con un efecto pepita próximo a 0. Hay un fuerte ascenso de la varianza a medida que aumenta la distancia entre puntos hasta llegar a 95 m en la parcela 1 y 30 m en la 2, momento en que comienza a descender. Se observa un incremento más fuerte de la varianza de la parcela 2, posiblemente debido a que ésta tiene un pendiente media más fuerte, un 13,09% frente al 6,10% de la parcela 1.

En la meseta del semivariograma de la parcela 1, se aprecia una discontinuidad a 100 m, posiblemente debida a que en esta superficie existen subparcelas de 1 Ha de extensión, con caminos entre ellas. Éstos fueron topografiados con bastante detalle, y pueden provocar estas discontinuidades.

A estas distribuciones experimentales se les ajustó un modelo gaussiano con un efecto pepita de 0,04, meseta de 0,83 y alcance de 95 para la parcela 1, y un efecto pepita de 0,011, meseta de 0,18 y alcance de 30 para la parcela 2. Los datos experimentales y los modelos teóricos de la figura 1, han sido escalonados.

El bajo valor del efecto pepita indica la validez del método para explicar la mayor parte de la varianza muestral, ya que este valor representa tan solo el 4,8% de la varianza en la parcela 1 y el 6,1 % en la 2.

De los resultados del Jack-knifing (figura 2) se desprende que el modelo ajustado explica bien la distribución de la varianza. Como se ha señalado, el Jack-knifing nos sirve para averiguar cuál es el número de vecinos ideal para el cálculo de la altura de un punto de valor desconocido mediante krigeado. Éste debe ser estimado comparando todos los resultados. En este

caso, este número ideal se sitúa en 24 vecinos para las dos parcelas, ya que éste es el punto en que todos los parámetros alcanzan un valor más cercano a su óptimo. En efecto se comprueba que la media de errores absolutos en las dos parcelas es prácticamente cero cuando se consideran 24 vecinos.

Otro criterio considerado como decisivo por muchos autores, la varianza de los errores relativos, está más próximo a uno en las dos parcelas efectuando krigeado con 24 vecinos.

Este resultado de Jack-knifing puede deberse a la gran densidad de medidas puntuales de modo que la altura en cada par x,y está relacionada con un número grande de vecinos.

Una vez obtenido y testado el semivariograma teórico, se introducen los datos en el SIG (tipo de modelo ajustado, efecto pepita, meseta, alcance y número de vecinos), se introduce el tamaño de la celdilla (en este caso 5x5 m), y se realiza el krigeado en bloques de los residuos. Con él se obtiene un MED, al que se le adicionará la tendencia retirada con anterioridad, obteniendo así el MED de las parcelas (figuras 3 y 4). El relieve en la parcela 1, es poco acusado, variando su altura entre 105,74 y 91,05 m. Se deduce de la forma del terreno, que el agua de escorrentía tendrá sólo una salida. En la parcela dos la pendiente es más acusada, variando su altitud entre 100,43 y 91,27 m. En esta parcela por el contrario, el agua de escorrentía tendrá más de una salida.

Otra ventaja de utilizar las técnicas de interpolación mediante krigeado reside en el hecho de que se pueden conocer la varianza de los errores de estimación.



Finalmente las aplicaciones más elementales de los MED conducen a una caracterización primera del relieve, de utilidad para posteriores estudios, por ejemplo los relacionados con la producción de escorrentía y erosión.

Utilizando los algoritmos correspondientes se pueden generar modelos de aspectos fisiográficos como por ejemplo pendiente, orientación, etc.

En la figura 5, a título de ejemplo, se presenta el mapa de gradientes de pendientes de la parcela 2, en la que se puede ver que a pesar de sus reducidas dimensiones, el modelo usado proporciona una resolución suficiente para representar valores de pendiente.

En la figura 6 aparece representado el modelo de drenaje y de los probables cursos en que se concentra la escorrentía en la

parcela 2. Es un mapa en donde aparecen el número de celdas que drenan a una celda dada. Da una idea del trazado de los cursos de agua, que tenderá a discurrir por las celdas con un valor mayor. Así se puede observar que hay tres cursos principales que cruzan la parcela, dividiéndose en surcos más pequeños.

## CONCLUSIONES

A partir de datos topográficos medidos en dos parcelas de cultivo, se puso en evidencia que los semivariogramas de los datos de altura se ajustaban a un semivariograma gaussiano, lo que demuestra la continuidad de los mismos.

Utilizando la información contenida en los semivariogramas teóricos se elaboró un

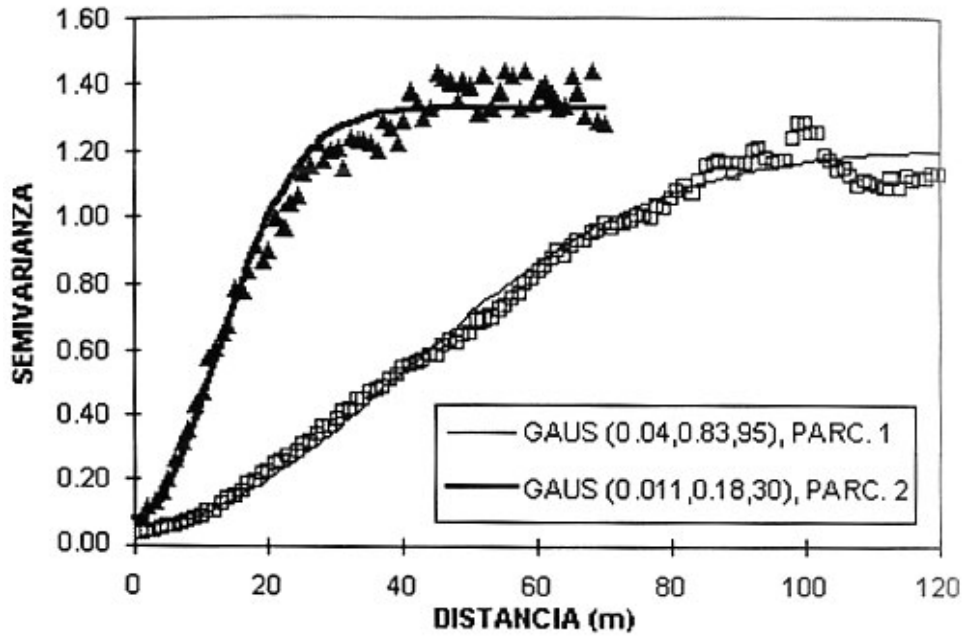


Fig. 1. Semivariogramas muestrales escalonados y modelos teóricos ajustados a los mismos.

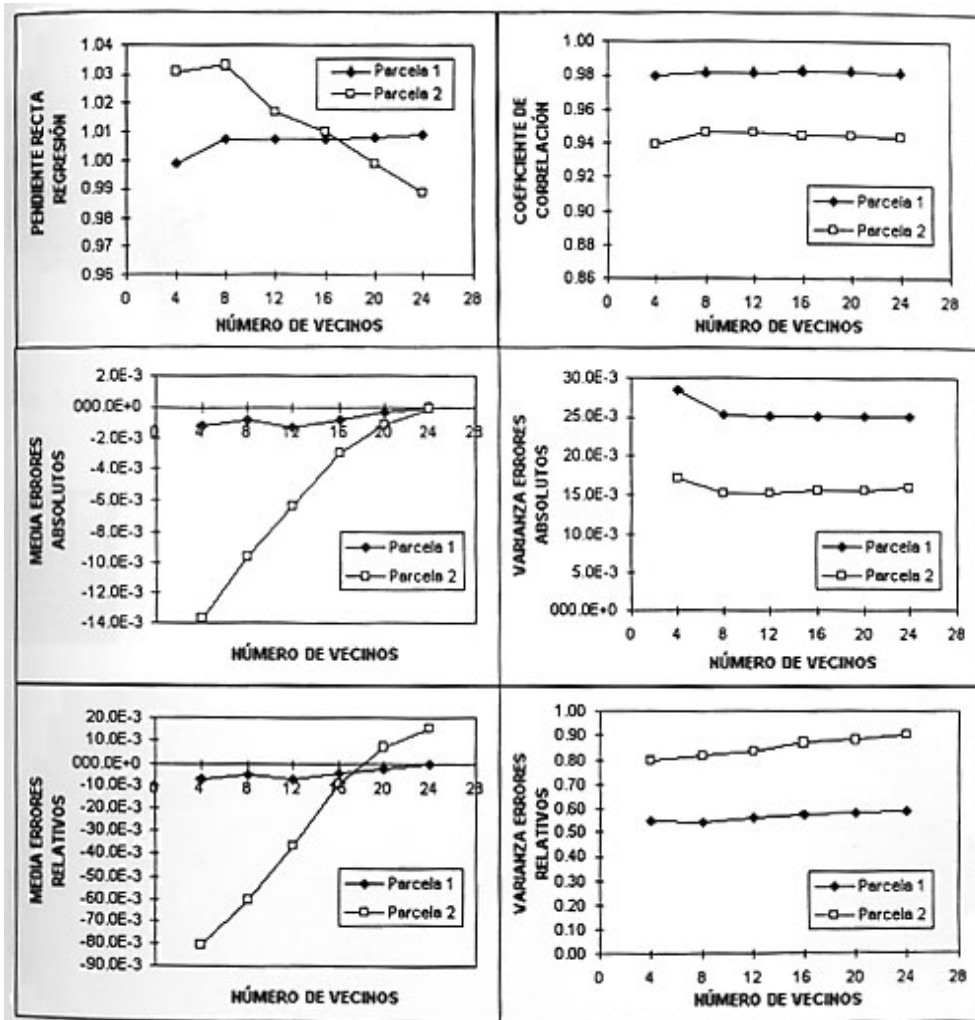


Fig. 2. Análisis de la bondad del ajuste, en base a los criterios de la técnica de «Jack-knifing».

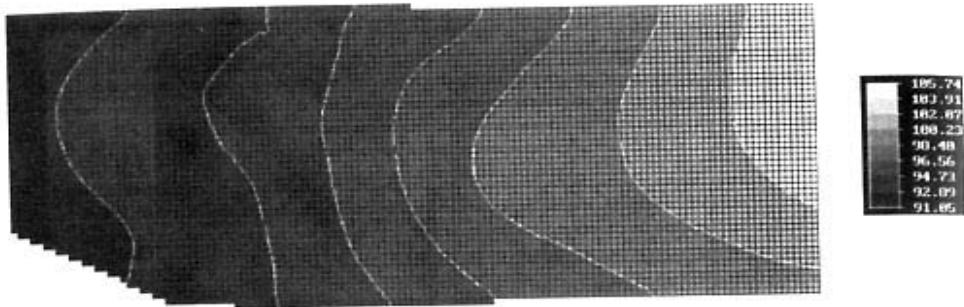


Fig. 3. MED parcela 1.

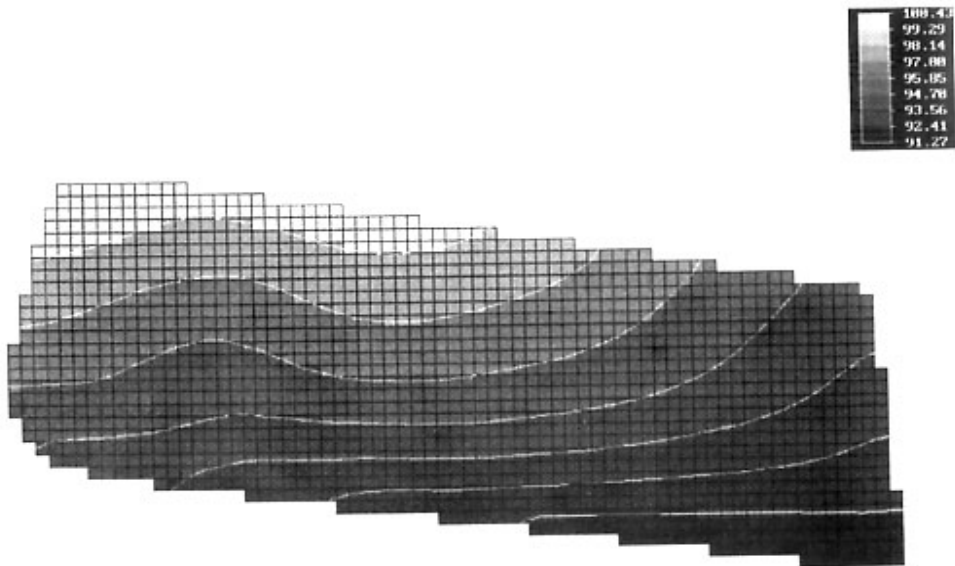


Fig. 4. MED parcela 2.

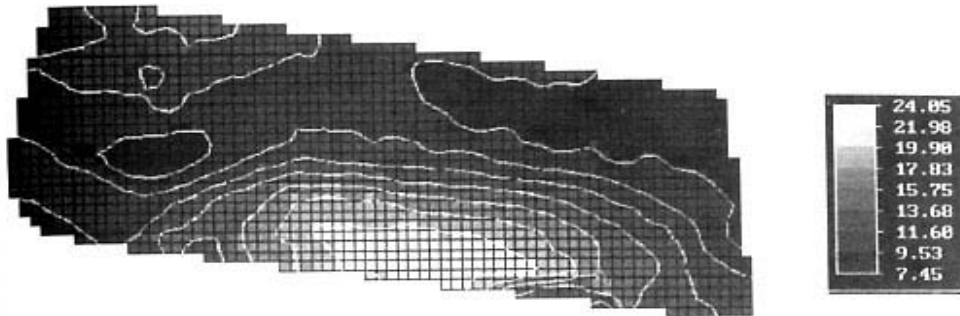


Fig. 5. Mapa de gradiente de pendientes de la parcela 2.

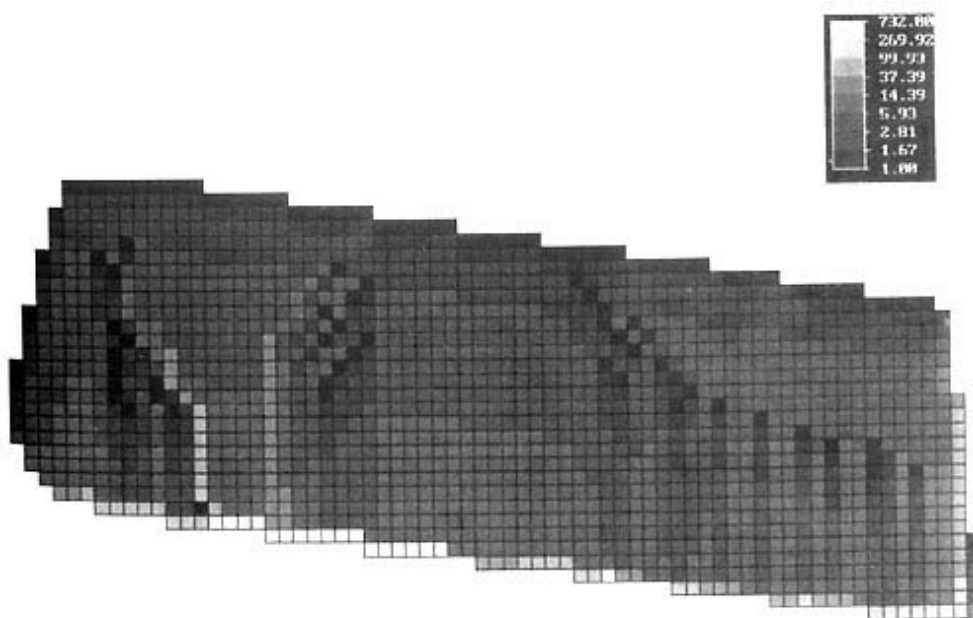


Fig. 6. Mapa con direcciones preferenciales de drenaje de la parcela 2.

MED de las dos parcelas, que describe el relieve con suficiente precisión para diversos usos, en particular el estudio de la erosión.

**BIBLIOGRAFIA**

- ARONOFF, S. 1989. *Geographic information systems: a management perspective*. WDL Publications, Ottawa.
- BURROUGH, P. A. 1993 The technologic paradox in soil survey: new methods and techniques of data capture and handling. *ITC Journal*, 1993-1:15-22.
- JOURNAL, A. G., HUIJBREGTS, CH. J. 1978. *Mining geostatistics*. Academic Press, Londres.
- NIELSEN, D. R.; TILLOTSON, P. M. & VIEIRA, S.R. 1983. Analysing field-measured soil-water properties. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, 6: 93-109.
- PAPRITZ, A., WEBSTER, R. 1995. Estimating temporal change in soil monitoring. I and II. *Eur. J. Soil Sci.*, 46:13-27.
- SAMPER, F. J., CARRERA, J. 1990. *Geostatística. Aplicaciones a la hidrología subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona. 484 pp.
- TOMLIN, D. C. 1990. *Geographic Information System and Cartographic Modelling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., EEUU. 249 pp.
- VAN DEURSEN, W. P. A., WESSELING, C. G. 1995. The PCRaster package. *Technical Report of de Department of Physical Geography*. University of Utrecht. The Netherlands. 198 pp.
- VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. 1983. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, 51(3): 1-75.
- VIEIRA, S. R., CASTRO O. M. DE & TOPP, G. C., 1992. Spatial variability of some soil physical properties in three soils of São Paulo - Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 27(2): 333-341.
- VIEIRA, S. R., TILLOTSON, P. M., BIGGAR, J. W., NIELSEN, D. R. 1997. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties. *Campinas, R. Bras. Ci. Solo* 21 (4), p. 525-533.