

# MEDIDA AUTOMÁTICA DE CAUDAL Y SEDIMENTOS EN UNA PEQUEÑA CUENCA EXPERIMENTAL DE MABEGONDO

*Cacheiro Pose, Mónica (1); Valcárcel Armesto, Monserrat (2)  
y Paz González, Antonio (1)*

*(1) Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira. 15071. A Coruña.  
(2) E.P.S. Universidad de Santiago de Compostela. Polígono de Augas Férreas s/n. 27002.  
Lugo.*

## SUMMARY

### **Automatic runoff and sediment yield measurement in an experimental small catchment at Mabegondo**

The objectives of this work are to describe the topographic characteristics and the devices installed in an experimental small catchment, for automatic measurement of sediment yield and runoff. The catchment is situated in the Research Agricultural Centre of Mabegondo, Abegondo (A Coruña). The land is devoted to agriculture and divided into fields with different uses. In order to assess the topographic characteristics, a survey was undertaken using an Abney-level. The experimental data set was analysed by means of geostatistical techniques. A theoretic model of spatial dependence was obtained from the measured points and verified through Jack-knifing. Interpolation was made through block kriging, so that a digital elevation model (DEM) was obtained which describes the 5.37 ha cathment area by means of 4 m x 4 m cells. The installed devices consist of a

gauging canal with a sensor to measure the runoff and an automatic sampler for the evaluation of solid capacity. A weather station near the catchment complete the experimental set up.

**Key words:** Geostatistic, kriging, GIS, DEM, gauging canal, sampler.

## RESUMEN

Los objetivos de este trabajo son describir la topografía y la instrumentación instalada en una pequeña cuenca experimental, para medir automáticamente su caudal y carga de sedimentos. La cuenca está situada en el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabe-gondo, Abegondo (A Coruña). Se trata de un terreno de cultivo, dividido en parcelas con distintos usos. Para describir la topografía, se efectuó un levantamiento topográfico, con una estación total. La serie de datos experimentales se analizó mediante técnicas geoes-tadísticas, obteniéndose un modelo teórico de dependencia espacial, que se validó mediante Jack-knifing. Se efectuó una interpolación mediante kriging por bloques para obtener, finalmente, un modelo de elevación digital (MED) que describe las 5,37 Ha de superficie de la cuenca mediante celdas de 4 m x 4 m. La instrumentación consiste en un canal de aforo para recoger la escorrentía, que tiene instalado un sensor para medida automática de caudal líquido y un toma-muestras automático para la evaluación del caudal sólido. Una estación meteorológica cercana a la cuenca completa las series de datos experimentales.

**Palabras clave:** Geoestadística, kriging, SIG, MED, canal de aforo, toma-muestras.

## INTRODUCCIÓN

Dado que el suelo constituye un medio poroso, con un sistema de huecos y grietas interconectados, puede dejar pasar agua a su través. Los procesos implicados en el movimiento del agua son el de entrada en el suelo (infiltración, entradas laterales o ascenso a partir de una capa freática), la redistribución entre distintos puntos (transferencia y acumulación), la absorción por parte de las plantas y la evaporación.

La primera etapa en el movimiento del agua en el suelo es la infiltración (I), que designa el proceso de entrada, generalmente vertical, de agua a través de la superficie. Al iniciarse la lluvia, un riego o llegar una corriente de agua sobre un suelo seco, la entrada tendrá lugar en condiciones no saturadas, principalmente bajo la influencia de los gradientes de potencial matricial por diferencias en el contenido de agua y, en menor medida, de la gravedad. Uno de los condicionantes de la infiltración (I) es las características del medio, es decir, la pendiente, la vegetación, la distribución del sistema de poros (SULLIVAN *et al.*, 1996) y el grado de encostramiento de la superficie (LADO *et al.*, 1998; TABOADA, 1988). La cantidad de agua aportada por lluvia (P) o por riego, condiciona el proceso de entrada de agua, que ocurrirá siempre y cuando se cumpla que  $P < I$ . En aquellos casos en que la intensidad de la lluvia vaya aumentando, llegará un momento en que el suelo no será capaz de infiltrar toda el agua que recibe. El exceso de agua formará charcos si el terreno es llano y, si se trata de una ladera, se movilizará a favor de la pendiente, dando lugar a escorrentía superficial. La escorrentía será tanto mayor cuanto menor sea la evaporación, la intercepción por la vegetación, y el encharcamiento en depresiones.

La escorrentía superficial genera erosión, siendo ésta una pérdida gradual del material que constituye el suelo, al ser arrastradas las partículas a medida que van quedando en superficie. Los procesos erosivos constituyen un impacto negativo, cuyo resultado es la degradación progresiva del recurso suelo.

La descripción del sistema de medida de los caudales de agua y sedimentos durante procesos de escorrentía en una pequeña cuenca agrícola, es uno de los objetivos de este trabajo. Para ello se instaló en el cierre de la cuenca, en la que no existen cursos permanentes de agua, una estación de aforo, constituida por un canal Venturi y un tomamuestras automático.

Otro de los objetivos es la descripción de la superficie del terreno mediante un modelo de elevación digital (MED). Esta metodología presenta interés en cualquier dis-

ciplina 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.

Para realizar el MED es necesario disponer de datos puntuales de altitud, que pueden medirse directamente mediante estaciones topográficas, 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.

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. El modelo de interpolación usado en este trabajo está basado en métodos geoestadísticos. Diversos autores (JOURNAL and HUIJBREGTS, 1978; SAMPER y CARRERA, 1990; PAPRITZ and 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.

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 estudios 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.

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 regularmente, tipo ráster, 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 geográfica (SIG).

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. 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.

En este trabajo se presenta la metodología usada para elaborar un MED, a partir de la información obtenida directamente mediante una estación topográfica. El método utilizado combina el uso de un SIG, tipo ráster, y la interpolación espacial mediante herramientas geoestadísticas. Se analizan los resultados obtenidos para una pequeña cuenca de cultivo, considerada representativa de una importante comarca agrícola de la Comunidad Autónoma de Galicia, y se describe el sistema instalado para medir posibles eventos de escorrentía y pérdida de suelo.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Caracterización topográfica de la cuenca

Se estudió una pequeña cuenca situada en el Centro de Investigaciones Agrarias de San Tirso de Mabegondo, Abegondo, A Coruña. El material geológico de partida sobre el que se asienta la cuenca, pertenece a la serie de los esquistos de Órdenes. Los suelos son de textura media (francos y franco-limosos) y susceptibles a la formación de costra superficial cuando se labran (TABOADA, 1998). Dicha cuenca está dedicada a cultivo. Durante el año hidrológico 1997-98 los usos del suelo de las diferentes parcelas fueron pradera, veza-avena, alfalfa y ensayos de pratenses.

### Análisis geoestadístico

Los datos topográficos se obtuvieron con una estación total (Sokkia SET5A), siendo éstos del tipo  $x,y,z$ . La densidad de muestreo fue de 326 puntos/ha.

Para el análisis de la variabilidad espacial de los datos medidos con la estación total, se usaron técnicas geoestadísticas descritas en VIEIRA *et al.* (1983), como se resume a continuación.

La geoestadística es una técnica que permite estudiar la dependencia espacial de una variable. Frente a la estadística clásica, que supone que las medidas realizadas en distintos puntos son independientes, la geoestadística parte del hecho de que existe una continuidad en las variaciones a lo largo del espacio, que pueden ser analizadas mediante el uso de semivariogramas. Caracterizando la heterogeneidad espacial podrán ser estimadas las variables en aquellos puntos en los que se desconoce su valor.

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:

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

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 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  $h$ , 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. Se representa por el símbolo  $C_0 + C_1$ , y es aproximadamente igual a la varianza de los datos. La distancia a la cual se estabiliza el semivariograma 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  $C_0$ . Su valor indica la discontinuidad del semivariograma para distancias inferiores a la menor distancia entre muestras, así como

errores de medida. El arranque del semivariograma en el origen es importante, indicando la suavidad del fenómeno si la pendiente es nula, y la presencia de discontinuidades si no lo es. 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) y VIEIRA *et al.* (1992).

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

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)^2} \right] \quad (2)$$

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. Por ello, cabe esperar que el modelo gaussiano sea el más adecuado para representar una variable continua como el relieve.

#### *Identificación y filtrado de una tendencia*

En ciertos casos, las variables regionalizadas 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:

$$Z(x) = m(x) + R(x) \quad (3)$$

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:

$$m(x, y) = A_0 + A_1x + A_2y \quad (4)$$

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 teniéndose en cuenta el sesgo y la curtosis de los residuos. Una vez eliminada la tendencia a través de varios modelos, se elige el que más aproxime estos valores (sesgo y curtosis) a 0 y 3 respectivamente (Valores de una función con una distribución normal). Además, el semi-variograma de los residuos debe mostrar una estructura espacial más fuerte que cuando no se considera tendencia.

Con los residuos se efectúa posteriormente el tratamiento usual (cálculo del semi-variograma, 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:

$$Z^*(x, y) = m(x, y) + R^*(x, y) \quad (5)$$

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

### *Jack-knifing*

Éste 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 validación 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.

### *Krigeado*

El krigeado es un proceso mediante el cual se obtiene una estimación del valor de una variable en un punto no muestreado, a partir de los valores de la variable en otros puntos medidos. Respecto a los métodos de interpolación, el krigeado ofrece estas ventajas:

- Los pesos de ponderación dados a los valores medidos no son arbitrarios sino que dependen de la variabilidad espacial descrita con el semivariograma.
- El krigeado es un método exacto, es decir, la interpolación de la variable en un punto de medida devuelve el valor de la variable en ese punto con un error de estimación nulo.
- El krigeado permite determinar cuál es el grado de precisión de las estimaciones realizadas.

Una vez obtenido el modelo teórico que mejor explica el semivariograma experimental, se emplea para calcular los valores de la variable objeto de estudio en aquellos puntos que no fueron muestreados. El valor estimado en una posición,  $x_0$ , se obtiene mediante:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (6)$$

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 ecuación (6) se obtiene un sistema de ecuaciones, conocido como ecuaciones de krigeado (7) en donde  $\gamma(x_i, x_i)$  es la semivarianza estimada usando el modelo teórico del semivariograma ajustado a los valores experimentales, que corresponde a la distancia entre los puntos localizados en la posición  $(x_i, x_i)$ , y  $\gamma(x_i, x_0)$  es la semivarianza correspondiente a la distancia entre los puntos localizados en la posición  $(x_i, x_0)$ . La solución del sistema de ecuaciones de krigeado (7) genera  $N$  valores de pesos  $\lambda$  y un valor del multiplicador de Lagrange,  $\mu$ , asociado al proceso de minimización de la varianza. Sustituyendo los valores de los pesos,  $\lambda_i$ , en la ecuación (6) es posible estimar los valores en cualquier posición,  $x_0$ , del espacio muestreado.

$$\begin{pmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} \quad (7)$$

La utilización de los valores insesgados y con varianza mínima obtenidos por krigado, permite construir mapas de isóneas o mapas tridimensionales para el examen y la interpretación de la variabilidad.

#### **Elaboración de un modelo de elevación digital (MED) integrado en un sistema 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 georreferenciadas 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 ráster (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 (generalmente 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 and WESSE-LING, 1995).

La secuencia básica del análisis de los datos para los mapas 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, se realiza un krigeado 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.
- Utilización del MED para describir mediante el SIG las características de la cuenca: pendiente, red de drenaje...
- Impresión de los mapas con las leyendas correspondientes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del semivariograma muestral de los datos topográficos, puso de manifiesto una importante autocorrelación entre pares de puntos vecinos. Debido al relieve de la parcela, 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 cier-

ta 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 la cuenca estudiada, la distancia máxima que se consideró fue de 160 m.

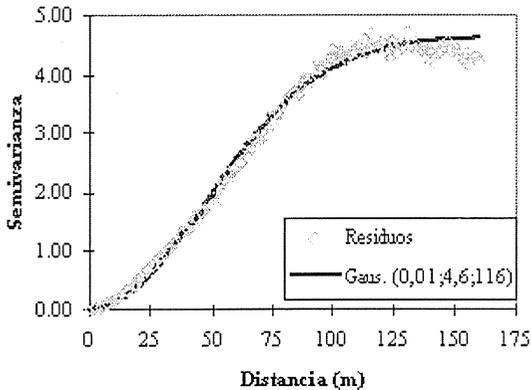


Figura 1. Semivariograma muestral y modelo teórico ajustado al mismo.

Se aprecia una fuerte dependencia espacial en el semivariograma (fig. 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 100 m, momento en que comienza a estabilizarse.

A esta distribución experimental se le ajustó un modelo gaussiano con un efecto pepita de 0,01, meseta de 4,6 y alcance de 116.

El bajo valor del efecto pepita, que representa tan sólo el 0,22% de la varianza, indica la validez del modelo usado para explicar la mayor parte de la varianza muestral.

La validación del modelo teórico se llevó a cabo mediante la técnica de Jack-knifing. De los resultados del Jack-knifing (fig. 2) se deduce que el modelo ajustado explica bien la distribución de la varianza. Como se ha señalado, el Jack-knifing sirve para averiguar cuál es el número de vecinos ideal para el cálculo de la altura de un punto de valor desconocido mediante krigado. Éste debe ser estimado comparando todos los resultados. En este caso, el número ideal se sitúa en 24 vecinos, ya que éste es el punto en que la mayoría de los parámetros alcanzan un valor más cercano a su óptimo. Un cri-

terio considerado como decisivo por muchos autores, la varianza de los errores relativos, está más próximo a uno 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. Por otra parte, estos resultados son similares a los obtenidos en trabajos previos (CACHEIRO *et al.*, 1998 a; CACHEIRO *et al.*, 1998 b; CACHEIRO *et al.*, 1998 c, CACHEIRO *et al.*, 1998 d).

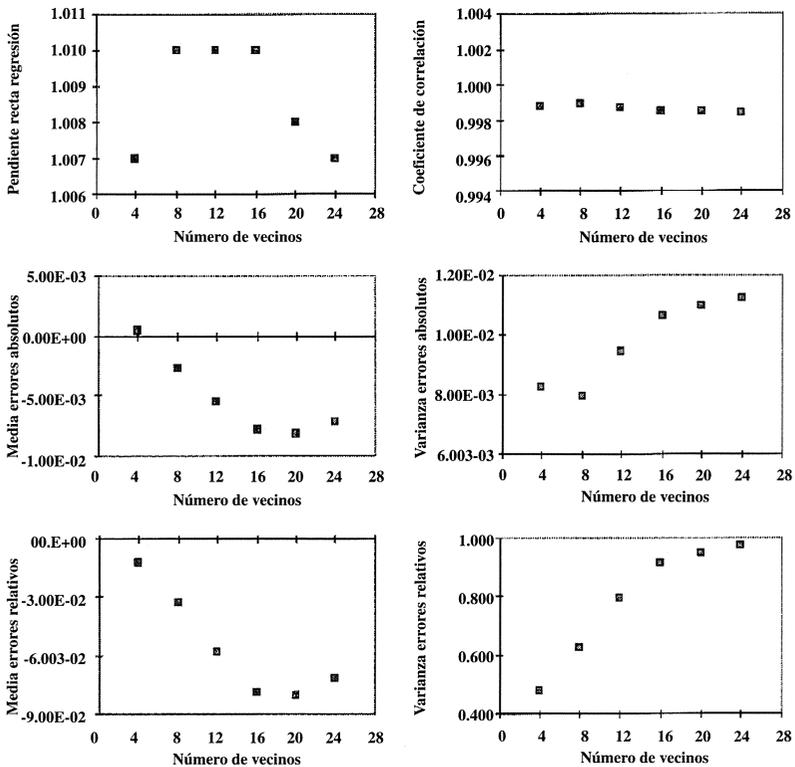


Figura 2. Análisis de la bondad del ajuste, en base a los criterios de la técnica del "Jack-knifing".

Una vez obtenido y validado 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 4 x 4 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 la cuenca (fig. 3). Se puede observar en él, que el relieve es poco acusado, variando su altura entre 120,26 y 96,29 m

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.

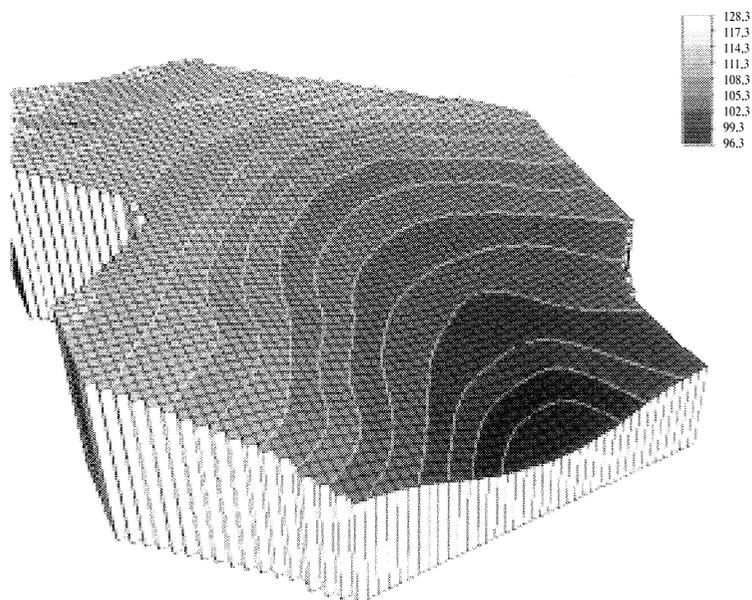
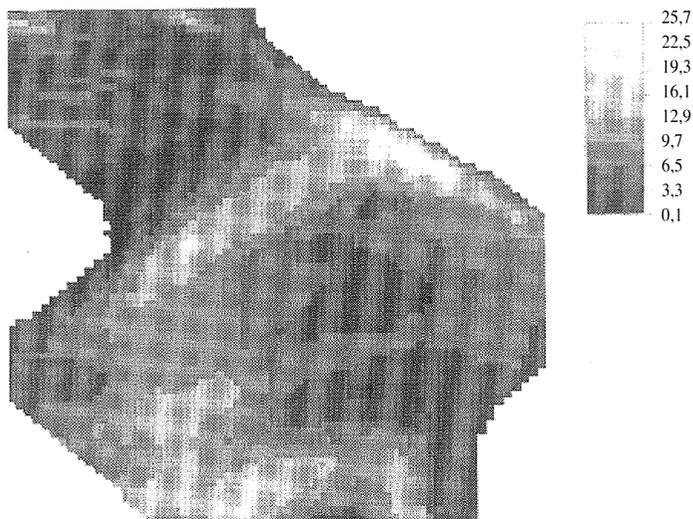


Figura 3. MED de la cuenca.

Finalmente las aplicaciones más elementales de los MED conducen a una caracterización primaria del relieve, de utilidad para posteriores estudios; por ejemplo los relacionados con la producción de escorrentía y erosión. Así, utilizando los algoritmos correspondientes se pueden generar modelos de aspectos fisiográficos, tales como pendiente, orientación, etc.

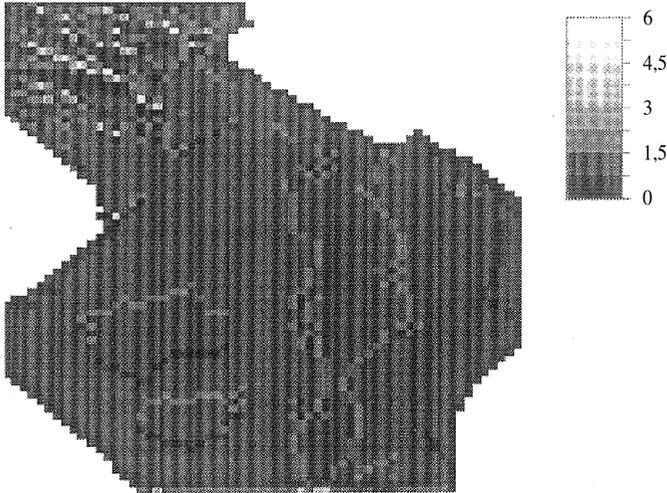


**Figura 4. Mapa de gradiente de pendiente.**

En la figura 4, a título de ejemplo, se presenta el mapa de gradiente de pendiente de la cuenca, en el que se puede ver que a pesar de las reducidas dimensiones de la misma, el método usado proporciona una resolución suficiente para caracterizar mediante diferentes valores de pendiente las diversas zonas.

En efecto, aunque la pendiente media es del 9,1%, se aprecian zonas relativamente llanas, con valores inferiores al 3,3% y otras escarpadas, con valores del orden de 22-25%. En el mapa de pendiente se visualizan, entre otros aspectos, la presencia de una zona escarpada próxima al cierre de la cuenca (bordeando el mismo), mientras que en el cierre la pendiente es ya menos acusada; ésto tiene consecuencias importantes sobre el transporte de sedimentos fuera de la cuenca.

En la figura 5 se puede observar el modelo de drenaje y de los probables cursos en que se concentrará la escorrentía. Es un mapa que representa el número de celdas que drenan a una celda dada, situadas aguas arriba. Da una idea del trazado de los cursos de agua efímeros durante e inmediatamente después de precipitaciones intensas, que lógicamente tenderán a discurrir por las celdas con un valor acumulativo mayor del pará-



**Figura 5.** Mapa con las direcciones preferenciales de drenaje.

metro representado. Así se puede observar que el agua de escorrentía tendrá sólo una salida, donde se encuentra situado el canal de aforo.

Usos del suelo	% superficie ocupada
Pradera	9,73
Veza-avena	43,25
Ensayos de pratenses	19,03
Alfalfa	27,99

**Tabla 1.** Usos del suelo en la cuenca.

Otra aplicación del MED es el cálculo de la superficie. Utilizando el SIG PCRaster (VAN DEURSEN and WESSELING, 1995) se obtuvo que la cuenca tiene una extensión de 5,37 ha. La distribución de los usos del suelo en la estación invernal del año agrícola 1997-1998 puede observarse en la tabla 1.

Una vez efectuada la recolección del cultivo de veza-avena en la primavera de 1998, la parcela que éste ocupaba, es decir el 43,25% de la superficie total de la cuenca, quedó a barbecho y sólo fue sembrada de nuevo, con un cultivo de pratenses en el otoño de 1998.

### **Equipamiento instrumental de la cuenca**

El equipamiento se encuentra en funcionamiento desde el año agrícola 1997-98. Durante este período no se registraron episodios importantes de escorrentía y erosión.

#### *Estación de aforo*

La estación de aforo instalada en el cierre de la cuenca está equipada para medir el caudal de escorrentía y la erosión. Consta de un canal aforador de estrechamiento largo, un equipo de registro de datos y un toma-muestras automático.

#### *Canal de aforo*

Los principios de medida del caudal en un canal aforador de estrechamiento largo, están ampliamente descritos en DAFONTE *et al.* (1999).

Para el aforo de caudales se utilizó un pequeño canal de estrechamiento largo, tipo canal Venturi, que consta de sección crítica, canal de medida y canal de aproximación. Dicho canal admite un caudal máximo de 75 m<sup>3</sup>/h (aproximadamente 20,8 dm<sup>3</sup>/s).

Una parte del canal es prefabricada, con las siguientes dimensiones:

Longitud: 2,78 m

Ancho: 35 cm

Alto: 25 cm

La longitud se amplió en obra civil de la misma sección interna en la parte del tramo de aproximación, resultando una longitud final de 3,48 m.

En este sistema de medida, el ajuste de los datos de caudal (Q) y nivel del agua (h), se realiza de acuerdo con los datos suministrados por el fabricante del canal aforador a una curva Q(h) con una ecuación del siguiente tipo:

$$Q \left( \frac{m^3}{s} \right) = C' \cdot h^{1,5} (m) \quad (8)$$

La precisión de la curva de caudales es del orden del 2 % en el caudal máximo.

#### *Medida del nivel de agua en los canales aforadores*

La medida de niveles de agua se lleva a cabo mediante sensores de ultrasonidos, cuyo principio de funcionamiento es el siguiente:

Los impulsos de ultrasonidos son generados cada segundo y transmitidos por el transductor hacia la superficie del líquido. En la superficie del agua estos impulsos serán reflejados y recibidos por el sensor. Se mide el retraso entre la emisión y la recepción de la señal, calculándose la distancia hasta la superficie del líquido usando la velocidad de propagación del sonido. Esta velocidad de propagación no es constante y varía en función de la temperatura y de la naturaleza del gas a través del cual el sonido es transmitido. La influencia predominante sobre la velocidad es la temperatura, que podría provocar errores en la distancia medida y así en el nivel del líquido.

La barra de referencia proporciona al sensor un medio para controlar regularmente la velocidad de propagación del sonido en el medio en el que se encuentra. Esta barra está fijada a una distancia conocida delante del sensor. El sensor mide el tiempo entre emisión y recepción de la señal procedente de la barra y calcula entonces la velocidad del sonido.

El sensor utilizado es un MSP 100-S12F de la marca KDG Mobrey Ltd, con barra de corrección de acero inoxidable de 346 mm de longitud. Rango de medida 0,4-8 m. Resolución: menor que 1 mm. Salida analógica 4-20 mA. Alimentación en corriente continua, intensidad nominal de al menos 22 mA, y voltaje de al menos 11 V en los bornes del sensor. Es necesario un calibrado previo para fijar el cero de medida.

#### *Toma-muestras*

El toma-muestras utilizado (ISCO modelo 2900) es secuencial, con capacidad para tomar 24 muestras separadas de 500 mL cada una. Está programado para tomar una muestra de agua a la salida del canal de aforo, cada vez que la adquisición de datos le envía una señal. La cadencia de toma de muestras es de 10 minutos, una vez el nivel de agua en el canal supera los 50 mm, y de 3 minutos, al superarse el umbral de altura de 100 mm en el mismo canal.

#### *Adquisición de datos*

La adquisición de datos es una HDL-600-A de CR2M, con tres entradas analógicas, una digital y una salida para control del toma-muestras, similar a la utilizada en la cuen-

ca experimental de Seixas, localizada en el Ayuntamiento de Taboada (Lugo) y descrita también en esta obra (DAFONTE *et al.*, 1999).

Los dos sensores de sonidos están conectados a las entradas analógicas y los datos registrados son datos promediados durante un período de 5 minutos cuando la altura de agua supera los 0 mm, y de un intervalo de 1 minuto cuando la elevación del nivel de agua es superior a 50 mm en el canal.

#### *Estación meteorológica*

Durante el año agrícola 1997-1998 no se dispuso de estación meteorológica a pie de cuenca, por lo que se usaron los datos de la estación situada aproximadamente a un kilómetro de distancia. Esta estación se encuentra en funcionamiento desde el año 1979, y registra las siguientes variables: precipitación, temperatura máxima y mínima y humedad relativa. Permite el análisis de series históricas y de curvas IDF (Intensidad Dura-ción Frecuencia).

#### **Síntesis de los resultados obtenidos**

Durante el año agrícola 1997-1998, el flujo de agua procedente de esta cuenca a través del canal Venturi instalado en su cierre, fue prácticamente nulo. Los escasos episodios registrados presentaron caudales máximos de magnitud inferior a 0,25 L/s, del mismo orden que el error experimental.

En una parte considerable de la superficie, la parcela sembrada de veza-avena durante el invierno (el 43,25% de la cuenca), el suelo estuvo sin cultivar durante varios meses, y en este período se efectuaron diversas labores. Se comprobó que, una vez labrada, la superficie del suelo evolucionaba hasta la formación de una costra mucho menos permeable que la superficie original.

En las zonas de mayor pendiente de esta parcela también se observó la presencia de surcos de erosión efímeros, tanto en el otoño del año 1997, una vez sembrado el cultivo de veza-avena, como en la primavera de 1998, con el suelo labrado. Estos surcos fueron, como mucho, de dimensiones decamétricas y con una sección inferior a 100 cm<sup>2</sup>. No obstante los desplazamientos de materiales por erosión, poco importantes en las dos fechas, quedaron limitados a redistribuciones en el interior de esta parcela; a pesar de que en ella se localiza el cierre de la cuenca, la carga de sedimentos vertida al exterior fue

prácticamente nula, ya que el drenaje de las aguas de escorrentía superficial hacia el exterior de la cuenca experimental, como ya se mencionó, también fue prácticamente nulo.

## CONCLUSIONES

A partir de medidas puntuales de altitud ( $z$ ), junto con sus coordenadas topográficas ( $x,y$ ) se elaboró un MED de una cuenca experimental de dimensiones reducidas, 5,37 ha. Para el tratamiento de los datos topográficos, se usaron herramientas geoestadísticas y un SIG tipo ráster. Se puso en evidencia que los datos residuales de altura se ajustaban a un modelo de semivariograma de tipo gaussiano y a partir de esta información modelizó el relieve a base de celdas de 4m x 4m.

A partir del MED se efectuó una caracterización primaria del relieve, que incluye el mapa de posibles direcciones de drenaje efímero y el mapa de pendiente. Uno de los campos que más requiere este tipo de información es el estudio de la erosión, dada la dependencia de la misma de la topografía del terreno.

Se describe un sistema automático de medida de la escorrentía y erosión instalado en el cierre de esta cuenca experimental. Durante el año agrícola 1997-1998, no se registraron episodios importantes de drenaje externo.

**AGRADECIMIENTOS:** Este trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto FAIR 1-CT95-0458, financiado por la Unión Europea.

**BIBLIOGRAFÍA**

- 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*, 1:15-22.
- CACHEIRO POSE, M., TABOADA CASTRO, M. T., VALCÁRCCEL ARMESTO, M. y DAFONTE DAFONTE, J. (1998 a). Mapping rill erosion within a cultivated field using geostatistic and GIS. *V Int. Symp. on Analytical Methodology in the Environmental Field*. A Coruña. Volumen II.
- CACHEIRO POSE, M., DAFONTE DAFONTE, J. y VALCÁRCCEL ARMESTO, M. (1998 b). Análisis geoestadístico de datos topográficos para la elaboración de modelos de elevación digital. *XIII Bienal de la Real Soc. Española de Historia Natural*. Vigo (Pontevedra). p. 114.
- CACHEIRO POSE, M., TABOADA CASTRO, M. T. y VALCÁRCCEL ARMESTO, M. (1998 c). Elaboración de modelos de elevación digital mediante técnicas geoestadísticas, y su uso en el estudio de la erosión de terrenos agrícolas. *III Cong. de la Soc. Española de Agricultura Ecológica*. Valencia. p. 56.
- CACHEIRO POSE, M., VALCÁRCCEL ARMESTO, M. y TABOADA CASTRO, M. T. (1998 d). Elaboración de modelos de elevación digital empleando técnicas geoestadísticas y sistemas de información geográfica. *Cad. Lab. Xeol. de Laxe*, 23:137-150.
- DAFONTE DAFONTE, J., NEIRA SEIJO, X. Y VALCÁRCCEL ARMESTO, M. (1999). Descripción de la instrumentación de una cuenca experimental para el estudio de la escorrentía y de la erosión. En: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*, editado por Paz González, A. y Taboada Castro, M. T. Universidad de A Coruña. oo. 239-254.
- JOURNAL, A.G. and HUIJBREGTS, CH. J. (1978). Mining geostatistics. Academic Press, Londres.
- LADO LIÑARES, M., TABOADA CASTRO, M. M. y DIÉGUEZ VILLAR, A. (1998). Variación de la infiltración en terrenos agrícolas. *XIII Bienal de la Real Soc. Española de Historia Natural*. Vigo (Pontevedra). p. 113.
- PAPRITZ, A. and WEBSTER, R. (1995). Estimating temporal change in soil monitoring. I and II. *European J. Soil Sci.*, 46:13-27.

- SAMPER, F. J. y CARRERA, J. (1990). *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona. 484 pp.
- SULLIVAN, M., WARWICK, J. J. and TYLER, S.W. (1996). Quantifying and delineating spatial variations of surface infiltration in a small watershed. *J. of Hydrology*, 181 (1-4):149-168.
- TABOADA CASTRO, M. M. (1998). *Dinámica de la formación de costras superficiales en suelos de cultivo*. Tesis de Licenciatura. Universidad de A Coruña. 92 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. and 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. and BIGGAR, J. W. (1983). Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, 51(3): 1-75.
- VIEIRA, S. R., DE CASTRO, O. M. and 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.