

IV Reunión de Geomorfología
Grandal d' Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J. , Eds.
1996, Sociedad Española de Geomorfología
O Castro (A Coruña)

UNA APROXIMACIÓN JERÁRQUICA A LA CARTOGRAFÍA DEL ESPESOR DEL SUELO EN AMBIENTES SEMIÁRIDOS

del Barrio, G. y Boer, M.

Estación Experimental de Zonas Aridas (CSIC), General Segura 1, 04001
Almería

RESUMEN

Se explora la producción de mapas de profundidad del suelo construyendo y modelizando un sistema de relaciones espaciales entre muestras georeferenciadas y variables topográficas derivadas de un Modelo Digital de Elevación a 30 m de resolución. El muestreo sigue una estratificación jerarquizada cuya representatividad se mantiene, de modo que el modelo producido es aplicable al total del territorio. El trabajo se ha realizado en dos pequeñas cuencas (20 km²) dentro del valle del Guadalentín (3300 km²), un territorio semiárido del sureste peninsular. La precisión de los mapas resultantes está en el intervalo 61-81% para pizarras, 40-55% para filitas y 72-78% para calizas. La baja precisión obtenida para las filitas parece relacionada con la imposibilidad de detectar sus facetas topográficas a la resolución de trabajo.

Palabras clave: muestreo estratificado, modelización espacial, análisis topográfico, áreas representativas, prospección, profundidad del suelo, ambientes semiáridos

ABSTRACT

We explored a method to produce soil depth maps that is based on the spatial modelling of a system of relationships between georeferenced field samples and topographic variables derived from a Digital Elevation Model at the 30 m resolution. The sampling design follows a hierarchical stratification to ensure representativeness, so that the model relationships may be applied to the entire territory. The work has been carried out in two small basins of 20 km² within the basin of the Guadalentín, a 3300 km² territory in SE Spain. The accuracy of the resulting maps ranges from 61 to 81% in shales, 40-55% in phyllite, and 72-78% in limestones. The low results obtained for phyllites seem to be related to undetected topographic features at the work resolution.

Keywords: stratified sampling, spatial modelling, terrain analysis, representative areas, survey, soil depth, semi-arid environments

INTRODUCCIÓN

Hoy día existe una demanda creciente de información cuantitativa sobre la variación espacial de las propiedades del paisaje. Su aplicación inmediata es la expresión cartográfica de trabajos prospectivos. Además, el uso combinado de varios mapas en el entorno de un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite la generación de nuevas variables de aplicación específica a un problema. Un uso más sofisticado de tales variables es su empleo en modelos distribuidos, capaces de simular el desarrollo local de un proceso.

Con frecuencia, el paso que limita esos enfoques se encuentra en la obtención de una cartografía fiable de las variables básicas. La aproximación tradicional para obtener un mapa de suelos o vegetación reposa en la capacidad de abstracción del equipo prospector, y en unos costes de validación que superan ampliamente las posibilidades de muchos proyectos. Los mapas resultantes, por otra parte, suelen estar formados por manchas cualitativas cuyos límites netos asumen transiciones irreales entre las unidades cartográficas a la escala de trabajo. A veces, simplemente, no existe un experto disponible para asistir a la elaboración de un mapa. Todos esos problemas aumentan proporcionalmente con el tamaño de la región a cartografiar.

En este trabajo presentamos una aproximación alternativa, basada en la estratificación jerarquizada del muestreo de la variable a cartografiar, en la búsqueda de relaciones con variables independientes distribuidas y generadas mediante algoritmos, y en la modelización espacial de esas relaciones. El resultado es un mapa en formato raster, es decir, formado por celdas de resolución conocida, que puede servir como entrada a un modelo y cuya fiabilidad es evaluada. Más concretamente, este trabajo resume los pasos seguidos para producir mapas de profundidad del suelo en dos cuencas representativas de un territorio relativamente extenso del sureste semiárido peninsular: el valle del río Guadalentín. El espesor del suelo determina, a su vez, otras propiedades importantes como la capacidad de almacenamiento de agua, y la cartografía de sus patrones espaciales es de gran importancia para muchos aspectos de la conservación y gestión de recursos naturales. El procedimiento se expone de forma modular, para favorecer su adaptación a otras necesidades u objetivos.

ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Guadalentín (Fig. 1) ocupa aproximadamente 3300 km², y contiene muchos de los problemas de la degradación del suelo en la zona mediterránea, dentro de un marco ecológico y socioeconómico típico de grandes territorios del sureste de España. Por esta razón fué designado como una de las Areas Piloto del Proyecto Medalus (THORNES y BRANDT, *en prensa*), lo que en la práctica supone concentrar trabajos con diversos objetivos y disciplinas a escalas diferentes.

Las zonas de Rambla del Chortal (20 km²) y Rambla Seca (21 km²) son dos sub-cuencas del valle principal, como se verá en la Sección 3.2. La primera esta formada por dos unidades litológicas: pizarras, ocasionalmente junto con grauvacas, y filitas intercaladas con finas capas de cuarcitas, dando lugar a un

relieve con vertientes abruptas y relativamente cortas, conectadas por una densa red fluvial dominada por ramblas. La topografía es, por tanto, compleja y de grano fino donde, presumiblemente, las condiciones que controlan la formación de suelo variarán en cortas distancias. La vegetación y usos del suelo son consecuentemente diversos, mostrando en general el abandono iniciado en las décadas de los 50 y 60. Excepto algunas áreas repobladas con *Pinus halepensis*, la vegetación actual consiste en un matorral abierto de *Anthyllis cytisioides*, *Artemisia campestris* y *Rosmarinus officinalis*, con algunos campos de almendros aún en explotación.

La Rambla Seca esta formada principalmente por calizas y margas. Tiene mayor desnivel entre las divisorias y los cauces, con vertientes más largas y menor densidad de drenaje. En la década de los 50 las laderas umbrías fueron repobladas con *Pinus halepensis*, mientras que las solanas permanecieron con un matorral abierto de *Juniperus* spp. y *Quercus coccifera*. El uso actual de la zona de calizas está restringido al pastoreo extensivo de ganado lanar y caprino.

ESTRATIFICACIÓN DEL MUESTREO

Como en muchos otros casos, este proyecto se enfrentaba al dilema de cubrir un territorio extenso y complejo con recursos limitados. La solución fue una estratificación jerarquizada del trabajo de campo. En primer lugar se identificó un conjunto de cuencas representativas del valle del Guadalentín, donde concentrar el esfuerzo y el presupuesto. Esas cuencas fueron posteriormente descompuestas en unidades litológicas, dentro de las cuales se midieron los atributos del suelo.

ELECCIÓN DE VARIABLES Y RESOLUCIONES

La topografía es un factor importante para la formación de suelos (JENNY, 1941), y su relación con propiedades como los espesores de los horizontes A y B, el contenido en carbonatos, el pH, o las clases de erosión y drenaje ha sido demostrada (WALKER *et al.*, 1968; DANIELS *et al.*, 1985; KREZNOR *et al.*, 1989; CARTER and CIOLKOSZ, 1991; BRUBAKER *et al.* 1993). Tales relaciones tienen un uso potencial en cartografía, siempre que puedan establecerse de modo cuantitativo entre atributos del suelo medidos en el campo y valores relacionados con la topografía local (BURROUGH, 1986). Estos valores pueden ser derivados automáticamente de un Modelo Digital de Elevación (MDE) mediante análisis topográfico (O'Loughlin, 1986; Moore *et al.*, 1991, 1993).

El MDE de las dos sub-cuencas fue calculado usando un algoritmo de interpolación (USA-CERL, 1991) a partir de las curvas de nivel a escala 1:50000 suministradas por el Servicio Geográfico del Ejército. Una resolución de 30 m pareció razonable dada la equidistancia de las curvas (20 m) y lo abrupto del terreno, con la ventaja adicional de ser compatible con la resolución de las imágenes Landsat TM. A partir del MDE se generó una serie de mapas conteniendo las variables topográficas que iban a actuar como predictores en el proceso de modelización: pendiente local (β); tamaño de cuenca específico, o área drenada por unidad de curva de nivel (A_s) (QUINN *et al.*, 1991); índice

topográfico de humedad ($W_i = \ln(A_s / \tan \beta)$) (BEVEN y KIRKBY, 1979); factor de longitud de vertiente ($T_c = (A_s / 22.13)^n (\sin \beta / 0.0896)^m$ donde $n=0.6$ y $m=0.3$) (MOORE y BURCH, 1986); convexidad vertical (VAN DEURSEN y WESSELING, 1991); y radiación potencial de onda corta para el solsticio de invierno, teniendo en cuenta la sombra producida por el relieve circundante (VAN DEURSEN y WESSELING, *op. cit.*).

SELECCIÓN DE LAS CUENCAS REPRESENTATIVAS

Se desarrolló un método objetivo y repetible para seleccionar cuencas representativas en grandes territorios (BARRIO *et al.*, 1996), basado en una regionalización del área de estudio y en la subsecuente ordenación de cuencas según su contenido de clases fisiográficas.

Debido al tamaño considerable del valle del Guadalentín, la selección de cuencas representativas se llevó a cabo usando mapas raster a escala 1:200000 y resolución de 200 m. Las variables utilizadas fueron esencialmente las mismas, para conservar la conexión con el trabajo a desarrollar posteriormente a mayor escala. Sin embargo, la convexidad vertical fué excluida por su escaso significado a resoluciones poco detalladas, y se incluyó un mapa de precipitación anual media (BOER y PUIGDEFÁBREGAS, 1995), para incorporar diferencias geográficas a través del valle.

La regionalización se realizó mediante un procedimiento multivariante. En primer lugar, los siete mapas raster fueron reunidos en una gran matriz de datos con siete columnas (una por cada mapa) y tantas filas como celdas válidas hubiese en un mapa cualquiera (81028, en este caso). Esta matriz fué clasificada a continuación mediante un algoritmo no jerárquico (BELBIN, 1991). El principal interés de los métodos no jerárquicos consiste en que trabajan iterativamente, sin requerir una matriz de asociación para las observaciones, con lo que pueden acomodar cantidades ingentes de datos (BELBIN, 1987). En este caso, el número de grupos a obtener fué fijado en 23, que posteriormente fueron fusionados mediante UPGMA (SOKAL y SNEATH, 1963) para rendir diez clases fisiográficas finales, cuya estructura interna podía ser investigada. Conociendo las coordenadas de cada celda y la clase a la que pertenece, es tarea fácil construir un mapa de la regionalización final (Fig. 2).

Habiendo clasificado el área en diez tipos básicos de paisaje, el siguiente paso fué seleccionar un conjunto de cuencas que representase propiamente la distribución de clases fisiográficas encontrada. Para ello, las cuencas de primer orden (método de Horton) fueron definidas usando un mapa del número de celdas drenadas aguas arriba (VAN DEURSEN, 1991). La red de drenaje se definió arbitrariamente, considerando como cauce toda celda drenando a más de 125 celdas (5 km^2). Entonces, se identificaron las cuencas que drenaban al extremo inferior de los canales de primer orden. El resultado de esta tarea fueron 175 cuencas, con una extensión media de 11 km^2 .

El siguiente objetivo era seleccionar un número manejable de cuencas. Este número fué establecido en seis por razones relativas a los recursos disponibles para realizar la cantidad de trabajo esperada. Dada la extensión del valle del Guadalentín, y que la regionalización estaba basada sólo en atributos físicos, se consideró importante producir una lista de cuencas en un orden de adecuación decreciente, de modo que cuencas muy representativas

desde el punto de vista fisiográfico, pero impracticables por diversas razones, pudiesen ser reemplazadas.

Las 175 cuencas fueron sometidas a una nueva clasificación no jerárquica en seis grupos, usando las frecuencias relativas de las clases fisiográficas en cada una de ellas como atributos. El algoritmo de clasificación identifica cuencas-semilla según un valor umbral del índice de (di)similaridad elegido, y después asigna iterativamente el resto de las cuencas a la semilla más próxima hasta que la clasificación se estabiliza. Por tanto, cada cuenca queda asignada a un grupo con cuyo centroide tiene una afinidad conocida, en términos del índice usado para la clasificación. El sistema es análogo a la función de pertenencia usada en las clasificaciones difusas (BURROUGH *et al.*, 1992).

Este fué el criterio de reemplazo, usado en conjunción con la litología dominante, para seleccionar las seis cuencas finales, entre ellas las ramblas del Chortal y Seca.

Una evaluación estadística del proceso permite comprobar su grado de representatividad. En primer lugar, un test de Kruskal-Wallis efectuado sobre la regionalización presenta valores en el intervalo 41399-12728E+07, lo que para nueve grados de libertad hace una significación de $\alpha < 0.00001$. Eso quiere decir que todas las clases fisiográficas tienen valores distintos para todas las variables usadas en la regionalización, que en consecuencia puede considerarse una partición óptima del paisaje. Por su parte, la superficie ocupada por las 175 cuencas de primer orden es aproximadamente el 60% del total del valle del Guadalentín. A pesar de que el relieve de algunas formaciones, como por ejemplo la llanura del cauce principal, están potencialmente sub-representadas, las frecuencias relativas de las clases fisiográficas son casi idénticas en el conjunto de cuencas de primer orden y en todo el valle ($\chi^2 = 3234.83$, g.l.=9; $\alpha < 0.00001$). Lo mismo puede decirse para la selección final de seis cuencas. Aunque algunos aspectos logísticos dieron lugar a reemplazos durante la selección, las frecuencias de las clases fisiográficas concuerdan de nuevo con la distribución de clases en el conjunto del valle ($\chi^2 = 279.53$; g.l.=9; $\alpha < 0.00001$). La conexión de representatividad queda establecida, y el trabajo de campo puede concentrarse en unas pocas zonas compactas, como se verá a continuación.

MUESTREO GEOREFERENCIADO

El trabajo se ha centrado en tres unidades litológicas: pizarras y filitas en la Rambla del Chortal, y calizas en la Rambla Seca. Estas unidades forman la mayor parte de las dos cuencas y se encuentran como zonas contiguas relativamente grandes: pizarras (6.9 km²), filitas (10.9km²) y calizas (12.1 km²).

El objetivo de obtener muestras independientes y no autocorrelacionadas se alcanzó de forma diferente en ambas cuencas, dependiendo de su accesibilidad. En la Rambla del Chortal, donde una carretera, varias pistas y vegetación abierta favorecen un buen acceso, se eligieron aleatoriamente 100 parcelas de muestreo usando una retícula de 210 m, una distancia correspondiente a siete celdas en los mapas raster a 30 m de resolución. Este número resultó demasiado optimista y hubo de ser reducido posteriormente. La Rambla Seca tiene un relieve más abrupto y menos practicable, especialmente en la zona de calizas, y requirió un diseño más específico. En primer lugar, la

zona de calizas fué dividida en bloques de 300 x 300 m, lo que corresponde a 100 celdas en los mapas raster, y se eligieron ocho conjuntos de seis bloques topográficamente representativos. Entonces, dentro de cada bloque se identificaron ocho parcelas de muestreo, alternativamente a 30, 60, 90 y 120 m del centro del bloque en ocho direcciones distintas (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). En todos los casos se utilizó un receptor GPS (Global Positioning System) para registrar las coordenadas finales de cada parcela de muestreo.

Las dimensiones de las parcelas son 30 x 30 m, correspondiendo a la resolución raster del trabajo, y el muestreo se realizó con mayor detalle para obtener una media y una desviación. Así, cinco cuadrados de muestreo de 1 m² fueron situados en las esquinas y en el centro de la parcela, donde se tomaron los datos de suelo. Aunque este trabajo trata de la profundidad, también se registraron otros atributos (ver Boer *et al.*, *en prensa*, para más detalles). La profundidad del suelo es entendida aquí como la distancia a la roca madre, fracturada o no, o bien la distancia a un horizonte consolidado, por ejemplo uno petrocálcico.

El conjunto final de datos, que requirió unos sesenta persona-día, consiste en 62 parcelas (=310 perfiles de suelo) en la Rambla del Chortal, distribuidas por igual entre pizarras y filitas, y 39 parcelas (=195 perfiles) en la zona caliza de la Rambla Seca.

ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO

Una vez registrada la variable dependiente, el siguiente paso consiste en usar la georeferencia de las observaciones para extraer valores locales de las variables independientes contenidas en forma de mapa raster. Tras ajustar un modelo en el que estas variables actúen como predictores, su continuidad espacial para el área de trabajo es utilizada para modelizar inductivamente un mapa de la variable dependiente, en este caso la profundidad del suelo.

Mientras la continuidad espacial de los predictores es un requisito, existen varias alternativas posibles para ajustar el modelo (ver AUSTIN *et al.*, 1994, para una revisión). Entre ellas están los Modelos Lineales Generalizados (MCCULLAGH y NELDER, 1989), los métodos de inducción numérica, como por ejemplo los árboles de decisión (BREIMAN *et al.*, 1984), y soluciones intermedias diseñadas para investigar procesos subyacentes a la distribución (BARRIO *et al.*, *en prensa*). Nosotros hemos elegido el método de Máxima Verosimilitud por su simplicidad y por su robustez para el trabajo con series pequeñas de datos. Los fundamentos estadísticos de este ajuste están explicados con especial claridad en Sanchez del Río (1989).

PREPARACIÓN DE LAS VARIABLES

Tres variables relacionadas con la profundidad del suelo fueron calculadas en cada parcela, utilizando los cinco perfiles: profundidad media, probabilidad de existencia de suelos someros, y probabilidad de existencia de suelos profundos. Los valores umbrales para las dos últimas fueron calculados separadamente para cada unidad litológica, y corresponden respectivamente al primer y cuarto cuartil de las distribuciones procedentes de todos los perfiles individuales para cada litología. Las parcelas fueron entonces separadas en

dos clases para cada una de esas variables (Tabla 1).

UNIDAD LITOLOGICA	VARIABLE	CLASE 1	CLASE 2
Pizarras (<i>R. Chortal</i>)	Profundidad media del suelo	£ 26.8 cm*	> 26.8 cm*
	P(prof £ 20 cm)	£ 0.2	> 0.2
	P(prof ≥ 40 cm)	£ 0.2	> 0.2
Filitas (<i>R. Chortal</i>)	Profundidad media del suelo	£ 28.6 cm*	> 28.6 cm*
	P(prof £ 20 cm)	£ 0.2	> 0.2
	P(prof ≥ 40 cm)	£ 0.2	> 0.2
Calizas (<i>R. Seca</i>)	Profundidad media del suelo	£ 16.0 cm*	> 16.0 cm*
	P(prof £ 5 cm)	£ 0.2	> 0.2
	P(prof ≥ 30 cm)	£ 0.2	> 0.2

* :Valores medios de las parcelas de muestreo en las unidades de pizarra, filitas y calizas.

Tabla 1. Definición de las clases de profundidad del suelo.

El conjunto de mapas conteniendo las variables independientes fué sometido a un Análisis de Componentes Principales (ACP), para obtener factores topográficos ortogonales (es decir, independientes entre sí) que permitiesen la aplicación probabilística de Máxima Verosimilitud, y también a efectos de compresión de datos. Cada litología fué tratada por separado en este proceso, que se realizó con Idrisi (EASTMAN, 1993). El resultado fueron nuevos mapas asociados a las componentes.

Para las tres litologías, las primeras cuatro componentes explican aproximadamente el 88% de la varianza. Por tanto, el resto fueron desechadas en los pasos siguientes. La primera componente está correlacionada con la pendiente y con el factor de longitud de vertiente, la segunda con el área drenada por unidad de curva de nivel y el índice topográfico de humedad, la tercera con la convexidad vertical, y la cuarta con la insolación.

INDUCCIÓN ESPACIAL

Siempre trabajando en cada litología por separado, se calculó la 'signatura topográfica' de cada clase de profundidad del suelo, es decir, el espacio de probabilidad topográfica calculado sobre las cuatro componentes principales. Entonces, usando esas signaturas cada sitio (celda) fué asignado a una clase de profundidad de suelo en función de su combinación de valores para las cuatro componentes, buscando la Máxima Verosimilitud. El procedimiento equivale a una clasificación supervisada como las realizadas comunmente en teledetección, y de hecho fué realizado con Idrisi. Las celdas no fueron asignadas a clase alguna en dos casos: cuando se trataba de cauces, tal y como se definen en la Sección 3.2, y cuando su mayor probabilidad de pertenecer a una clase no llegaba a 0.95.

VALIDACIÓN CRUZADA

El tamaño del conjunto de datos de campo, relativamente pequeño, nos forzó a utilizar todos ellos para calcular los espacios de probabilidad, sin

poder dejar una fracción a parte que pudiera ser posteriormente usada en una validación. Como alternativa, aplicamos una validación cruzada del proceso de inducción. En este procedimiento, el modelo (aquí, la signatura topográfica) es elaborado sólo con la mayor parte de los datos originales, dejando una pequeña fracción sin utilizar y sobre la cual se comprueba su capacidad de predicción. Esto se repite rotativamente para todas las muestras, de modo que cada parcela es comprobada al menos una vez, y tiene una oportunidad de ser clasificada correcta o incorrectamente (ISAACS y SRIVASTAVA, 1989; BREIMAN *et al.*, 1984). Los límites de confianza para las precisiones obtenidas fueron calculados usando métodos descritos en JENSEN (1986).

RESULTADOS

Los mapas de profundidad del suelo para ambas cuencas se muestran en Fig. 3. Pueden encontrarse detalles sobre la influencia relativa de las componentes topográficas en BOER *et al.* (*en prensa*). La validación cruzada indica precisiones de 65%, 81% y 61% para los tres mapas correspondientes a la unidad de pizarras, 50%, 55% y 40% para los correspondientes a la unidad de filitas, y 78%, 72% y 75% para la unidad de calizas. Comparando estos valores con los obtenidos para mapas levantados mediante prospecciones tradicionales, normalmente dentro del intervalo 59-70% (MARSMAN y DE GRUIJTER, 1986; BELL *et al.*, 1992), los resultados son aceptables para las unidades de pizarra y caliza, mientras que podrían mejorar en el caso de las filitas.

Una explicación posible podría basarse en la fiabilidad de las variables independientes, o dicho de otro modo, en la precisión con que el diferente grano topográfico tallado en cada tipo de litología es reflejado a una resolución fija de 30 m. Para explorar esta posibilidad, BOER *et al.* (*op.cit.*) calcularon semivariogramas usando tres de las variables topográficas (pendiente, área drenada por unidad de curva de nivel, e insolación), encontrando lags del orden de 300 m para las calizas, 120 m para las pizarras, y no consiguiendo detectarlos para las filitas. El tamaño del lag es proporcional a la autocorrelación espacial, y en la práctica esos resultados muestran que una resolución de 30 m captará mejor las facetas topográficas de las calizas y pizarras que las de las filitas, para las cuales es poco detallada (ver BARRIO *et al.*, 1993, para una discusión sobre este tema). En consecuencia las relaciones entre suelo y topografía, aunque fueran igual de fuertes en la unidad de filitas, no serían detectables a 30 m de resolución.

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha explorado la posibilidad de usar variables topográficas derivadas de un MDE a 30 m de resolución, junto con un conjunto reducido de observaciones de campo georeferenciadas, para predecir y cartografiar la profundidad del suelo en tres unidades litológicas con relieves, patrones edáficos y usos del suelo diferentes. Los resultados han sido evaluados en términos de porcentaje de aciertos, y su fiabilidad sugiere conexiones formales entre variables y escalas de observación. Este hecho suele ser considerado con más intuición que método en la mayoría de las prospecciones.

La selección de las unidades donde se ha desarrollado el trabajo ha sido realizada con criterios numéricos, objetivos y repetibles. De este modo se mantiene una conexión de representatividad entre el gran territorio de más de 3000 km², verdadero objetivo de la investigación, y las pequeñas áreas piloto de unos 20 km². La importancia de esta aproximación reside en que no hay obstáculo teórico para extrapolar el modelo producido para las áreas piloto al territorio del que son representativas. Así, los modelos se utilizan como 'librerías' de funciones que permiten el levantamiento de extensiones cuyo coste sería prohibitivo de otro modo (ver LAGACHERIE *et al.*, 1995, para un enfoque similar).

El interés de esta aproximación está contenido en sus pasos básicos, que tienden a coincidir con las secciones del presente texto. Las técnicas o escalas concretas aquí empleadas pueden reemplazarse de acuerdo con otras necesidades específicas. En general, las variables topográficas pueden derivarse de fuentes generalmente disponibles a precios económicos, como un MDE. Por ello, esta aproximación es especialmente apropiada para regiones grandes o remotas que (todavía) carecen de un marco conceptual para relacionar patrones espaciales con actividad de procesos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha desarrollado como uno de los objetivos del proyecto cooperativo MEDALUS II (Mediterranean Desertification And Land Use), financiado por la Comunidad Europea en su Programa de Medio Ambiente con el contrato EV5V-CT92-0128.

REFERENCIAS

- AUSTIN, M.P., MEYERS, J.A. y DOHERTY, M.D. (1994): Predictive models for landscape patterns y processes, Sub-project 2, Modelling of landscape patterns y processes using biological data. Canberra: Division of Wildlife and Ecology, CSIRO.
- BARRIO, G.del, ALVERA, B. y DIEZ, J.C. (1993): The choice of cell size in Digital Terrain Models: an objective method. En M. ROBINSON (ed.): Methods of Hydrological Basin Comparison. Wallingford. Inst. Hydrol. Rep. No 120, 190-196.
- BARRIO, G.del, ALVERA, B., PUIGDEFABREGAS, J. y DIEZ, C. (en prensa): Response of high mountain landscape to topographic variables. *Landscape Ecology*.
- BARRIO, G.del, BOER, M.M. y PUIGDEFÁBREGAS, J. (1996): Selecting representative drainage basins in a large research area using numerical taxonomy on topographic y climatic raster overlays. Proceedings of the Joint European Conference y Exhibition on Geographical Information, Barcelona, 27-29 Marzo 1996. 398-407.
- BELBIN, L. (1987): The use of non-hierarchical allocation methods for clustering large sets of data. *Aust. Computer J.*, 19, 31-41.
- BELBIN, L. (1991): PATN Technical Reference. Canberra: CSIRO, 222p.
- BELL, J.C., CUNNINGHAM, R.L. y HAVENS, M.W. (1992): Calibration y validation of a soil-terrain model for predicting soil drainage class. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 1860-1866.
- BEVEN, K.J. y KIRKBY, M.J. (1979): A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43-69.
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J.H., OLSHEN, R.A. y STONE, C.J. (1984): Classification y Regression Trees. Belmont, California: Wadsworth Int. Gr.

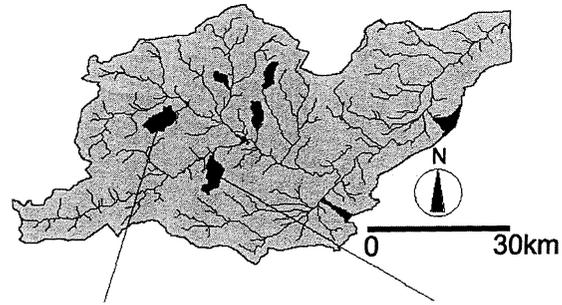
- BOER y PUIGDEFABREGAS (1995) Assessing spatial patterns of precipitation y soil moisture in dry Mediterranean landscapes using digital terrain analysis. En IBÁÑEZ, J.J. Y MACHADO, C. (eds.): Variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias ambientales. Zaragoza. Editorial Geoforma.
- BOER, M., BARRIO, G.del y PUIGDEFABREGAS, J. (en prensa): Mapping soil depth classes in dry mediterranean areas using terrain attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*.
- BRUBAKER, S.C., JONES, A.J. LEWIS, D.T. y FRANK, K. (1993): Soil properties associated with landscape position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* , 57, 235-239.
- BURROUGH, P.A. (1986): Principles of Geographical Information Systems for land resources management. Oxford: Oxford University Press, 194 p.
- BURROUGH, P.A., MACMILLAN, R.A. y VAN DEURSEN, W. (1992) Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations y topography. *J. Soil Sci.*, 43, 193-210.
- CARTER, B.J. y CIOLKOSZ, E.J. (1991): Slope gradient y aspect effects on soils developed from sandstone in Pennsylvania. *Geoderma*, 49, 199-213.
- DANIELS, R.B., GILLIAM, J.W., CASSEL, D.K. y NELSON, L.A. (1985): Soil erosion class y landscape position in the North Carolina Piedmont. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49, 991-995.
- EASTMAN, J.R., (1993): IDRISI 4.1 User's guide. Worcester, Massachusetts: Clark Univ.
- ISAAKS, E.H. y SRIVASTAVA, R.M. (1989): Applied geostatistics. Oxford: Oxford University Press. 561p.
- JENNY, H. (1941): Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. New York: McGraw-Hill.
- JENSEN, J. (1986): Introductory image processing: a remote sensing perspective. Englewood, NJ: Prentice Hall.
- KREZNOR, W.R., OLSON, K.R., BANWART, W.L. y JOHNSON, D.L. (1989): Soil, landscape, y erosion relationships in a Northwest Illinois watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 1763-1771.
- LAGACHERIE, P., LEGROS, J.P. y BURROUGH, P.A. (1995): A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma*, 65, 285-301.
- MARSMAN, B. y DE GRUIJTER, J.J. (1986): The quality of soil maps. A comparison of survey methods in a sandy area. Wageningen : Soil Survey Papers . 15, Netherlands Soil Survey Inst., 103pp.
- MCCULLAGH, P. y NELDER, J.A. (1989): Generalized Linear Models, 2nd ed. London: Chapman and Hall.
- MOORE, I.D. y BURCH, G.J. (1986): Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1294-1298.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. y LADSON, A.R. (1991): Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological y biological applications. *Hydrol. Processes*, 5, 3-30.
- MOORE, I.D., GESSLER, P.E., NIELSEN, G.A. y PETERSON, G.A. (1993): Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 443-452.
- O'LOUGHLIN, E.M. (1986): Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resour. Res.*, 22, 794-804.
- QUINN, P., BEVEN, K.J., CHEVALLIER, P. y PLANCHON, O. (1991): The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrol. Processes*, 5, 59-79.
- SANCHEZ DEL RÍO, C. (1989): Análisis de Errores. Madrid: Eudema Universidad, 180 pp.
- SOKAL, R.R. y SNEATH, P.H.A. (1963) Principles of numerical taxonomy. San Francisco: W.H. Freeman.
- THORNES, J.B. y BRANDT, J. (eds.) (en prensa) Mediterranean Desertification and Land use. London: Wiley and Sons.

- USA-CERL. (1991): GRASS 4.0. User's manual. United States Army Corps of Engineers. Construction Engineering Laboratory, Champaign, Ill.
- VAN DEURSEN, W.P.A y WESSELING, C.G. (1991): The PC-RASTER package. Utrecht: Dept. of Physical Geography, University of Utrecht.
- WALKER, P.H., HALL, G.F. y PROTZ, R. (1968): Relation between landform parameters y soil parameters. Soil Sci. Soc. Am. J., 32, 101-104.

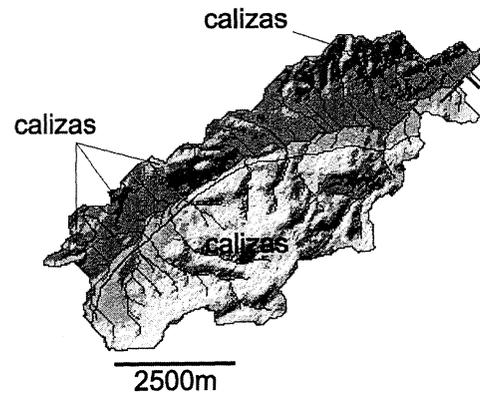
Pies de Figura

- Fig. 1. Localización de las dos cuencas piloto en el valle del Guadalentín.
- Fig. 2. Regionalización en diez clases fisiográficas.
- Fig. 3. Distribución predicha de la profundidad del suelo en las tres unidades litológicas (ver significado de las clases en Tabla 1).

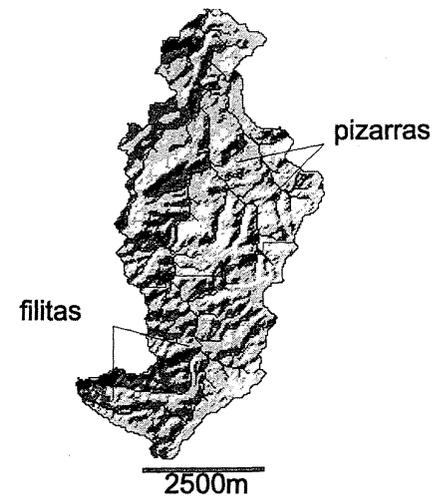
Río Guadalentín

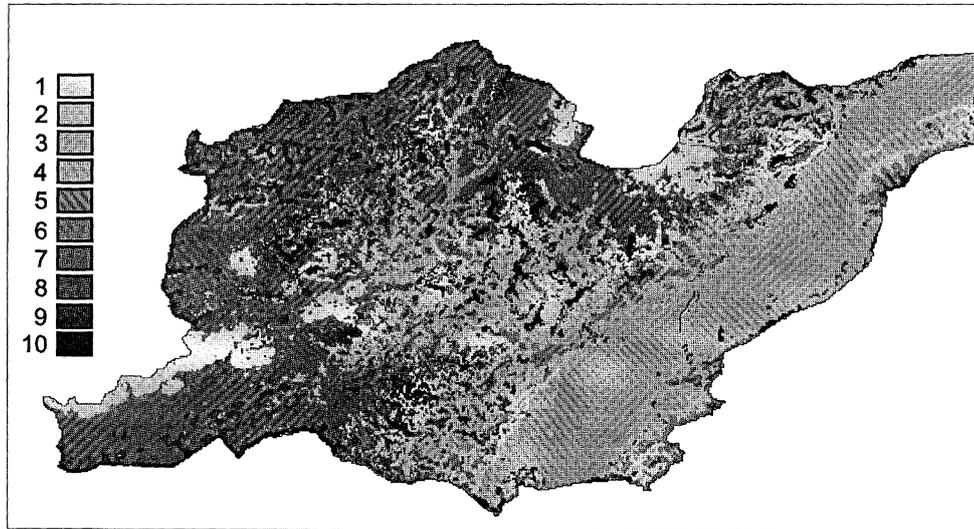


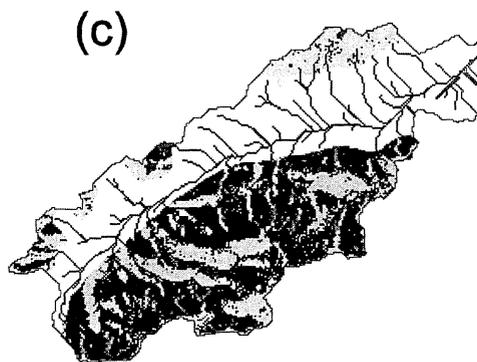
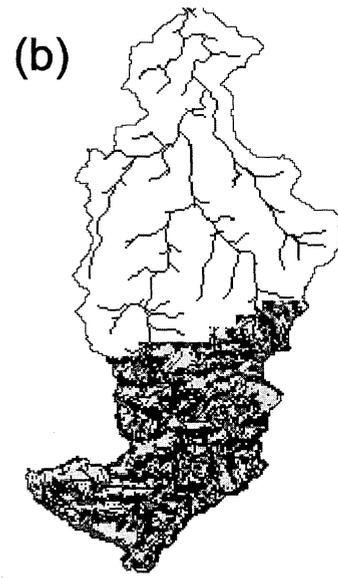
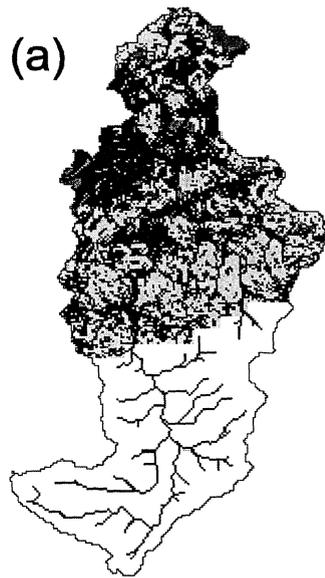
Rambla Seca



Rambla del Chortal







Clase 1 

Clase 2 

No clasificado 

Otras litologías 