

VARIABILIDAD DE PROPIEDADES FÍSICAS DE SUELOS FORESTALES. APLICACIÓN A LA CUENCA RASA DE COGULERS (EL SOLSONÈS, PREPIRINEO CATALÁN)

E. ACUÑA y R. M. POCH

Departament de Medi Ambient y Ciències del Sòl. Universitat de Lleida. Av. Rovira Roure 177, 25198 Lleida

e-mail: eacuna@macs.udl.es

Abstract. The objectives of this work are: to know the spatial variability of soil physical properties, through the evaluation of the conventional soil map validity for discriminating soil cartographic units with different hydrological behaviour and to characterise their structure or variation model by geostatistical methods. A nested sampling of forty-eight points from two cartographic units mapped at scale 1:50.000 were done. Physical properties were determined at each point. The soils are Entisols and their main use is forestry. The results showed that the principal components are referred to the soil water retention capacity in function of the bulk density, and the porosity and the internal stoniness. The saturated hydraulic conductivity was one of the properties that discriminated the soil units. The experimental semivariograms were fitted to theoretical models. The fitting of the theoretical semivariograms was better at shorter h distances, and more disperse as h increases. The obtained semivariograms suggest that physical properties have less variability at distances shorter than 300 m.

Keys words: variability, physical properties, principal components, discriminant analysis, semivariograms

Resumen. Los objetivos del trabajo son conocer el modelo de variación espacial de las propiedades físicas del suelo, mediante la evaluación de los mapas de suelos convencionales como discriminantes de unidades cartográficas con comportamiento hidrológico distinto y caracterizar su estructura o modelo de variación mediante geoestadística. Se realizó un muestreo anidado de 48 puntos en un mapa de suelos a escala 1:50.000 en los que se determinaron propiedades físicas. Los suelos son Entisoles y su principal uso es forestal. Los resultados muestran que las componentes principales están referidas a la capacidad de retención de agua en función de la densidad aparente, volumen poroso y contenido de elementos gruesos dentro del suelo. La conductividad hidráulica saturada es una de las propiedades que discriminan las unidades de suelos. Los semivariogramas muestrales fueron ajustados a modelos teóricos. El ajuste de los semivariogramas es más claro a las distancias de h más cortas, apareciendo mayor dispersión de éstos con el incremento de h. Los semivariogramas obtenidos sugieren que las propiedades tienen menor variabilidad a distancias menores de 300 m.

Palabras clave: variabilidad, propiedades físicas, componentes principales, análisis discriminante, semivariogramas

INTRODUCCIÓN

La relación de las propiedades del suelo con el movimiento y almacenamiento de agua es muy compleja, y no única. La estimación de la variabilidad espacial de las propiedades físicas de una unidad cartográfica de suelos es muchas veces inferida cualitativamente a partir de la textura, estructura, materia orgánica o densidad aparente. De todas maneras las medidas directas de las propiedades físicas son necesarias para estimar su variabilidad. Esta información podría ser usada con los modelos físicos para predecir la infiltración y el movimiento del agua a través del suelo mediante funciones de edafotransferencia (Naney *et al.*, 1983).

La conductividad hidráulica es una característica espacialmente variable, pero es constante bajo condiciones de saturación para alguna posición determinada en el campo en un tiempo dado (Moosegar y Warrick, 1986). La alta variabilidad espacial exhibida por las medidas de la conductividad hidráulica saturada está asociada con la heterogeneidad de las propiedades del suelo (Giménez *et al.*, 1999). En particular los suelos con muchos elementos gruesos dentro del perfil y sobre la superficie presentan grandes variaciones en sus propiedades (hidrológicas principalmente) de carácter anisotrópico que se manifiestan a cortas distancias (Pla, 1999). El conocimiento de la variabilidad de las propiedades de los suelos es esencial para hacer una interpretación y una predicción correcta del funcionamiento de éstas ya sea en una unidad cartográfica de suelos o de paisaje. Hoy en día se utilizan las técnicas geoestadísticas para caracterizar la variabilidad y la estructura de variación de las propiedades físicas, químicas y morfológicas de los suelos, ya sea su variabilidad isotrópica o anisotrópica (Trangmar *et al.*, 1985).

Por otro lado, pocos estudios de campo relatan la relación de las propiedades físicas del suelo asociadas a suelos superficiales bajo

bosque, con la variabilidad espacial de dichas propiedades en el ámbito de unidades cartográficas. Generalmente éstos suelos contienen elevados porcentajes de elementos gruesos y existe poco conocimiento sobre la influencia que éstos tienen sobre procesos edafológicos e hidrológicos relativo a los suelos donde no están presentes (van Wesemael *et al.*, 1996; López, 1999; Pla, 1999). La presencia de piedras aumenta la tasa de infiltración del agua en el suelo a causa de la expansión y contracción entre las piedras y el suelo, dando como resultado la formación de canales y macroporos. Sin embargo, las piedras reducen la capacidad de almacenamiento y retención del agua de los suelos las cuales disminuyen con el aumento de éstas de manera significativa (Pritchett, 1991; Poesen y Lavee, 1994).

Los datos que aquí se analizarán son el resultado de un muestreo anidado realizado por Bodet, (1999) en la cuenca Rasa de Cogulers (El Solsonès) en el prepirineo catalán, cuyo principal uso es forestal, con suelos superficiales y alto contenido de elementos gruesos. En los puntos muestreados se determinaron varias propiedades físicas. Las cuestiones planteadas en el presente trabajo son en primer lugar cual de todos los parámetros analizados es más importante en las unidades cartográficas de suelos y si éstas variables pueden ser utilizadas para discriminar unidades cartográficas en un levantamiento de suelos convencional. En segundo lugar, se cuestiona si es posible que a partir de variables simples como las obtenidas en un levantamiento sistemático, poder inferir variables más complejas de medir en el campo como la permeabilidad o infiltración.

Los objetivos del estudio son, determinar qué variable o conjunto de variables explica(n) mejor la variabilidad de las propiedades hidrológicas del suelo en las zonas estudiadas, correspondientes a suelos superficiales y pedregosos bajo uso forestal, evaluar la validez de los mapas convencionales como discrimi-

nantes de unidades con comportamiento hidrológico distinto, determinar los semivariogramas de las distintas variables estimadas para analizar su comportamiento (variabilidad) en el espacio y, finalmente, determinar si es posible utilizar muestreos anidados para construir semivariogramas de variables edáficas que permita caracterizar su modelo de variación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los suelos predominantes de la cuenca en estudio son una asociación de Ustorthent lítico, franca, mezclada (calcárea), méstica y Ustorthent típico, franca, mezclada (calcá-

rea), méstica, poco profundos (Estruch, 1998). El uso de la cuenca es forestal en más del 70% (*Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*), agrícola y en menor cuantía ganadero.

El levantamiento de los datos se realizó seleccionando dos unidades cartográficas de los suelos de 19 y 43 hectáreas respectivamente de la cuenca Rasa de Cogulers (fig. 1). Dentro de ellas se determinaron las propiedades físicas e hidrológicas del suelo con el muestreo anidado (nested sampling) a distancias mayores de 200 m entre sitios y 200, 50, 12, 3 m en las distintas etapas para tener un diseño de muestreo de 2x3x2x2x2 para un total de 48 puntos (Bodet, 1999).

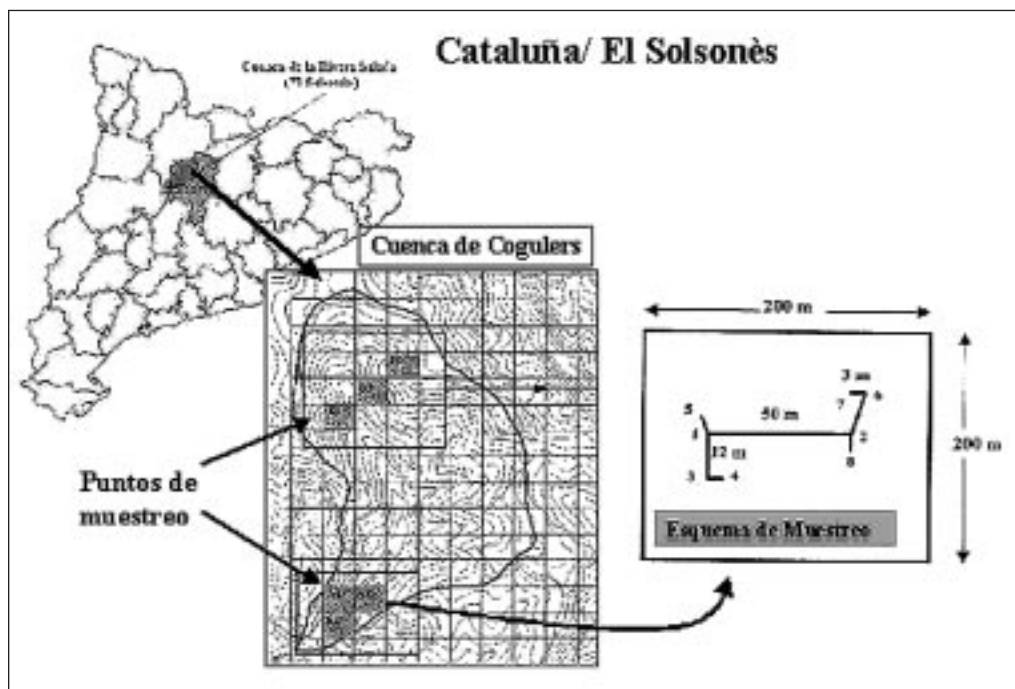


FIGURA 1. Ubicación de la cuenca de Cogulers y esquema de muestreo

Por cada sitio de muestreo se determinó, la profundidad efectiva del suelo (Psuel), profundidad del horizonte orgánico (Pho), densidad aparente (método del orificio, Daf, método del cilindro, Dac), la porosidad derivada de la de la densidad aparente (Pf de Daf

y Pc de Dac, respectivamente), conductividad hidráulica saturada (Ks) con el permeámetro de Guelph, agua retenida a capacidad de campo (Ag33) y retenida al punto de marchitez permanente (Ag1500) por el método de las placas de Richard, la capacidad de reten-

ción de agua disponible (CRAD) y la sorptividad (S) de los datos obtenidos con el permeámetro de Guelph.

La elaboración de los datos consiste en un análisis estadístico convencional, basado en el análisis de componentes principales y discriminante, y otro análisis geoestadístico de las propiedades físicas determinadas en ambas unidades cartográficas.

La determinación de los componentes principales se realizó con el programa SAS/STAT®, versión 6.06, (SAS Institute Inc., 1994) y se utilizó para caracterizar la población estudiada. El análisis discriminante se realizó mediante el STEPDISC procedure (SAS Institute Inc., 1994), el cual ejecuta el análisis discriminante *stepwise* (paso a paso) a variables cuantitativas que pueden ser útiles para discriminar entre clases (Klecka, 1980). Este análisis permite clasificar las observaciones en grupos que en este caso son las unidades cartográficas.

El instrumento geoestadístico que caracteriza el modelo de variación de una variable regionalizada es el semivariograma (Sparks y Englund, 1988). Éste contiene toda la información referente a la variable analizada, tales

como zona de influencia, anisotropía, y continuidad de la variable en el espacio. Teóricamente el semivariograma pasa por el origen, y cuando no es así, se dice que hay un efecto *nugget* o pepita, el cual es función de la escala (Ovalles, 1999) y es indicativo de un fenómeno puramente aleatorio sin ninguna correlación espacial (Samper y Carrera, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de componentes principales.

La tabla 1 muestra las correlaciones encontradas entre las propiedades de suelos determinadas en la cuenca Rasa de Cogulers (El Solsonès), provenientes del análisis del muestreo anidado. De manera general se pueden apreciar los bajos valores de correlación entre las distintas propiedades, lo cual puede estar en correspondencia con la alta variabilidad (alto coeficiente de variación) de los valores obtenidos en los sitios de muestreo, de acuerdo a los resultados de Bodet (1999). En ellos la mayoría de las propiedades analizadas muestran mayor variabilidad a distancias cortas no incluidas en el diseño empleado para el levantamiento de datos.

TABLA 1. Matriz de correlación de las propiedades físicas donde se aplicó el muestreo anidado, Rasa de Cogulers (El Solsonès).

Variable	Psucl	Pho	Pvol	Dac	Daf	Pc	Pf	CRAD	Ag33	Ag1500	Ks	S
Pesuel	1.00											
Pho	0.13	1.00										
Pvol	-0.02	-0.04	1.00									
Dac	0.01	-0.26	0.24	1.00								
Daf	-0.33	-0.52	0.28	0.41	1.00							
Pc	-0.01	0.13	-0.27	-0.98	-0.36	1.00						
Pf	0.33	0.53	-0.29	-0.41	-0.99	0.37	1.00					
CRAD	-0.39	-0.16	0.12	0.26	0.31	-0.24	-0.32	1.00				
Ag33	-0.001	-0.10	0.18	0.18	0.25	-0.18	-0.26	0.67	1.00			
Ag1500	0.37	0.06	0.18	0.04	0.05	-0.04	-0.06	0.06	0.76	1.00		
Ks	0.09	0.69	0.22	-0.21	-0.25	0.08	0.25	-0.18	-0.10	0.09	1.00	
S	-0.07	0.05	0.08	0.07	0.02	-0.07	-0.02	0.04	-0.01	-0.03	0.18	1.00

Psucl (profundidad efectiva del suelo, cm); Pho (profundidad del horizonte orgánico, cm); Daf (densidad aparente por el método del hoyo, Mg/m³); Dac (densidad aparente por el método del cilindro Mg/m³); Ks (conductividad hidráulica mm/h); Pvol (pedregosidad en volumen, %); Ag33 (agua retenida a capacidad de campo, %); Ag1500 (agua retenida al punto de marchitez permanente, %); Pc (porosidad total derivada de Dac %); Pf (porosidad total derivada de Daf, %); CRAD (capacidad de retención de agua disponible, %); S (sorptividad, cms-1/2).

Ambas densidades aparentes (método del cilindro y orificio) presentan altos valores de correlación negativos con la porosidad total derivada de sí mismas. Entre sí (la porosidad total) presentan un valor de correlación de 0.37. Este bajo valor puede deberse a que el segundo método tiene en cuenta los elementos gruesos, y el primero no.

La profundidad del horizonte orgánico muestra correlaciones positivas con la porosidad total (0.53) derivada del método del hoyo y también con la conductividad hidráulica saturada (0.69). La presencia de elementos gruesos (pedregosidad en volumen) presenta una correlación casi uniforme con todas las propiedades pero a un nivel bajo.

La variable profundidad efectiva del suelo muestra un mayor grado de correlación positiva con las propiedades como la retención de agua a 1500 kPa (0.37), así como también con porosidad total (0.33) derivada del método del orificio.

Los parámetros de capacidad de retención de agua en el suelo presentan correlaciones altas entre sí: la CRAD presenta correlaciones con la capacidad de retención de agua a 33 kPa y con la capacidad de retención de agua a 1500 kPa de 0.68 y 0.76 respectivamente.

Por otro lado, para la elección del número de componentes principales se tomaron aquellos componentes cuyos valores son mayores de 1 (Tabla 2). Como podemos apreciar la evaluación nos sugiere retener un total de cinco componentes principales que explican entre ellos más del 82.6% de la variabilidad total. El primer componente explica 31.22 % de la varianza total y se compone principalmente por los vectores positivos (Tabla 3) de la densidad aparente (Daf 0.43 y Dac 0.36), capacidad de retención de agua disponible (0.29) y agua retenida a 33 kPa (0.26), y por el vector negativo de la porosidad total derivada de la Daf (-0.44). Esta primera componente puede interpretarse como de compacidad, relacionada con la capacidad de retención de agua disponible del suelo.

TABLA 2. Evaluación de las componentes principales del muestreo anidado en la Rasa de Cogulers (El Solsonès)

Evaluación de Componentes Principales				
	Nº Componentes principales	Autovalores	Proporción	% de la variabilidad explicada
PRIN1	1	3,74	0.3122	31.22
PRIN2	2	2,0	0.1674	16.74
PRIN3	3	1,6	0.1336	13,36
PRIN4	4	1,4	0.1178	11.78
PRIN5	5	1,1	0.0927	9.27

La segunda componente explica un 17% de la varianza total y está representada principalmente por la retención de agua a 1500 kPa y a 33 kPa con valores de 0.57 y 0.47, respectivamente, así como también la profundidad del horizonte orgánico (0.33). Esta componente podría ser interpretada como de

capacidad de retención de agua del suelo y se correlaciona positivamente con la gran mayoría de variables de manera discreta dado los bajos valores de los autovalores.

La tercera componente explica un 13.3% de la varianza total y podría ser interpretada como una componente relacionada negativa-

mente con el volumen poroso del suelo, representada por la densidad aparente derivada del cilindro (0.42), por los vectores negativos de la porosidad total derivada de la densidad aparente del cilindro (-0.48) y del agua retenida a 33 kPa (-0.41). La cuarta componente explica un 12% y está referida principalmente a la variable conductividad hidráulica (0.41), a la sorptividad (0.33) y con un

vector negativo de la profundidad efectiva del suelo de (-0.57). Es difícil interpretar esta componente ya que el espesor del suelo podría influir negativamente en la conductividad hidráulica y la sorptividad. Sin embargo, podríamos referirnos a la drenabilidad o a la capacidad de infiltración del agua en suelo como importantes para esta componente.

TABLA 3. Vectores principales de las variables medidas en la Rasa de Cogulers (El Solsonès)

/Variables	PRIN1	PRIN2	PRIN3	PRIN4	PRIN5
Pesuel	-0.16	0.31	0.08	-0.57	0.20
Pho	-0.31	0.33	0.21	0.27	-0.17
Pvol	0.18	0.25	0.25	0.20	0.41
Dac	0.36	0.09	0.42	-0.27	-0.27
Daf	0.44	-0.13	-0.01	0.13	0.35
Pc	-0.33	-0.14	-0.47	0.22	0.28
Pf	-0.44	0.12	0.01	-0.13	-0.35
CRAD	0.29	0.12	-0.25	0.31	-0.50
Ag33	0.26	0.47	-0.41	0.05	-0.16
Ag1500	0.09	0.57	-0.29	-0.17	0.21
Ks	-0.22	0.34	0.32	0.41	0.18
S	0.02	0.07	0.25	0.33	-0.06

Pesuel (profundidad efectiva del suelo, cm); Pho (profundidad del horizonte orgánico, cm); Daf (densidad aparente por el método del hoyo, Mg/m³); Dac (densidad aparente por el método del cilindro Mg/m³); Ks (conductividad hidráulica mm/h); Pvol (pedregosidad en volumen, %); Ag33 (agua retenida a capacidad de campo, %); Ag1500 (agua retenida al punto de marchitez permanente, %); Pc (porosidad total derivada de Dac %); Pf (porosidad total derivada de Daf, %); CRAD (capacidad de retención de agua disponible, %); S (sorptividad, cms-1/2).

La quinta componente está referida principalmente a la pedregosidad dentro del perfil del suelo y la densidad aparente determinada por el método del hoyo con valores de autovectores de 0.41 y 0.35. Se destaca también el vector negativo de la capacidad de retención de agua disponible (-0.50). Esta componente está referida a la capacidad de almacenamiento de agua en función del contenido elementos gruesos dentro del perfil del suelo. Pritchett, (1991), argumenta que el incremento de contenido de piedras en el perfil de los suelos forestales aumenta el drenaje (o la infiltración del agua en el suelo), a su vez incrementa el volumen de los macroporos y disminuye la capacidad de almacena-

miento del agua.

Análisis Discriminante

El análisis discriminante ha partido de la hipótesis de que las unidades cartográficas estudiadas pertenecen a dos poblaciones distintas.

Los resultados de éste análisis nos muestran que la distancia general al cuadrado entre las unidades cartográficas muestreadas fue de $D^2_{12}=4.84$. Ello significa que los puntos muestreados en la unidad cartográfica uno serán clasificados desde un centroide con valor cero hasta el límite de 4.84 y todas aquellas observaciones que estén por encima de este rango serán clasificadas en la segun-

da unidad cartográfica y viceversa. Es decir, este valor se toma como umbral para clasificar una observación en uno u otro grupo o unidad cartográfica como es el caso.

El modelo realiza una restitución de los valores para comenzar a seleccionar las variables de mayor poder discriminante en la función discriminante. Calcula también la eficacia de dicha función para clasificar todas las observaciones en sus respectivos grupos o unidades cartográficas como este caso.

Se aprecia en la tabla 4 que, 19 de las 24 observaciones tomadas en la unidad cartográfica uno fueron clasificadas en ese grupo y 5 observaciones fueron clasificadas en la unidad cartográfica dos, mostrando así el modelo una eficiencia alrededor del 80%. En la unidad cartográfica dos el modelo actuó con mayor eficiencia (87%), es decir de las 24 observaciones, clasificó 21 para esa unidad y 3 para la uno. Esto puede significar que hay mayor homogeneidad en la unidad cartográfica dos sin precisar aún que variable o variables contribuyen a este comportamiento.

TABLA 4. Número de observaciones y porcentaje clasificado dentro de cada unidad cartográfica

Unidad Cartográfica	1	2	Total
1	19 79.17	5 20.83	24 100
2	3 12.50	21 87.50	24 100
Total	22	26	48
Porcentaje	45.83	54.17	100
Previo	0.50	0.50	

La selección de las variables que mejor discriminan en las unidades cartográficas se realizó en nueve pasos. El modelo clasificó cuatro variables, profundidad efectiva del suelo, seguida de la porosidad total derivada del método del hoyo, la porosidad derivada del método del cilindro, la densidad aparente por el método del hoyo, profundidad del horizonte orgánico y la conductividad hidráulica considerando su R^2 . Después de ser introducida la última variable, el modelo removió las variables densidad aparente y la porosidad derivada de la misma. Esto puede ser debido al grado de correlación entre ellas y a su bajo poder discriminante respecto de K_s .

Las propiedades que más definen, en este caso, las unidades cartográficas del mapa de suelos son profundidad efectiva del suelo, porosidad derivada de la densidad aparente

(método cilindro), profundidad del horizonte orgánico y la conductividad hidráulica (Tabla 5). Propiedades que tienen la ventaja de ser de fácil determinación (las tres primeras) y al estar relacionadas con la conductividad hidráulica saturada, podrían permitir inferirla para cada una de las unidades.

Análisis geoestadístico

Para el análisis de las variables a través de los semivariogramas se optó por el *modelo esférico*, se caracteriza por alcanzar la meseta a una distancia finita ($h=a$). Es indicativo de fenómenos continuos con un conjunto a lo sumo numerable de discontinuidades, es decir, fenómenos cuya representación puede presentar quiebros. Estos quiebros se pueden producir a distintas escalas con fluctuaciones de pequeña amplitud pero gran fre-

TABLA 5. Resumen del análisis discriminante para las variables medidas en la Rasa de Cogulers (El Solsonès)

Paso	Variable		R ² Parcial	F Estadístico	Prob>F	Wilks' Lambda	Prob<Lambda
	Retenida	Removida					
1	Pf		0.28	18.23	0.0001	0.716	0.0001
2	Pesuel		0.12	6.24	0.0161	0.628	0.0001
3	Pc		0.07	3.61	0.0638	0.581	0.0001
4	Daf		0.06	3.03	0.0884	0.542	0.0001
5	Pho		0.05	2.30	0.1367	0.514	0.0001
6	Ks		0.08	3.79	0.0584	0.470	0.0001
7		Daf	0.04	2.12	0.1530	0.495	0.0001
8		Pf	0.01	0.84	0.3630	0.505	0.0001

Psuel (profundidad efectiva del suelo, cm); Pho (profundidad del horizonte orgánico, cm); Daf (densidad aparente por el método del hoyo, Mg/m³); Dac (densidad aparente por el método del cilindro Mg/m³); Ks (conductividad hidráulica mm/h); Pc (porosidad total derivada de Dac %); Pf (porosidad total derivada de Daf, %).

cuencia, como de amplitud grande y frecuencia baja lo cual se corresponde con las propiedades cartográficas en un mapa de suelos (Samper y Carrera, 1996; Ribes, 1996; Ovalles, 1999).

Dada la gran dispersión de los datos de conductividad hidráulica y la sorptividad se elaboraron los semivariogramas muestrales y el semivariograma teórico con el logaritmo natural de los datos de campo.

El ajuste del modelo teórico al semivariograma muestral se realizó con el método de

mínimos cuadrados (Samper y Carrera, 1996).

En las figuras 2 y 3 se presentan los semivariogramas para la conductividad hidráulica saturada. A pesar de elaborar el semivariograma muestral con el logaritmo natural de los datos y lograr un mejor ajuste del modelo teórico, persiste la dispersión de los puntos a medida que aumenta la distancia (h), existiendo muchas fluctuaciones de los valores (poca correlación entre los puntos), aunque presenta un ajuste bastante significativo a menor distancia (h).

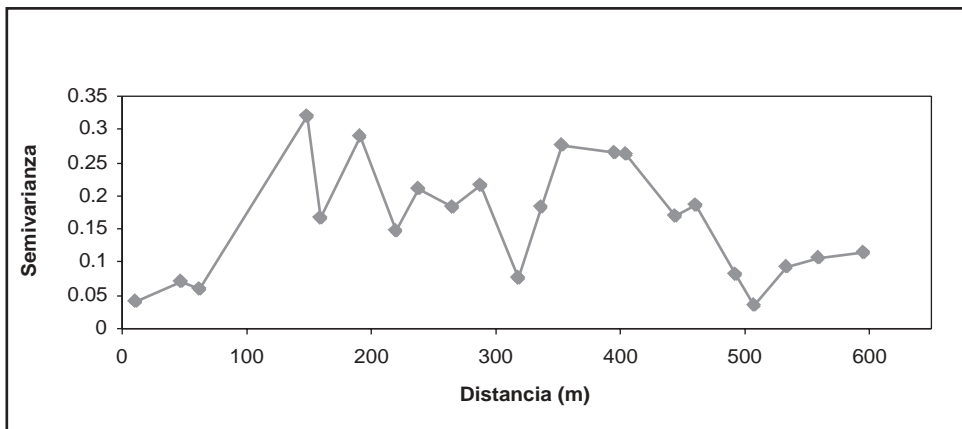


FIGURA 2. Semivariograma muestral para Ks

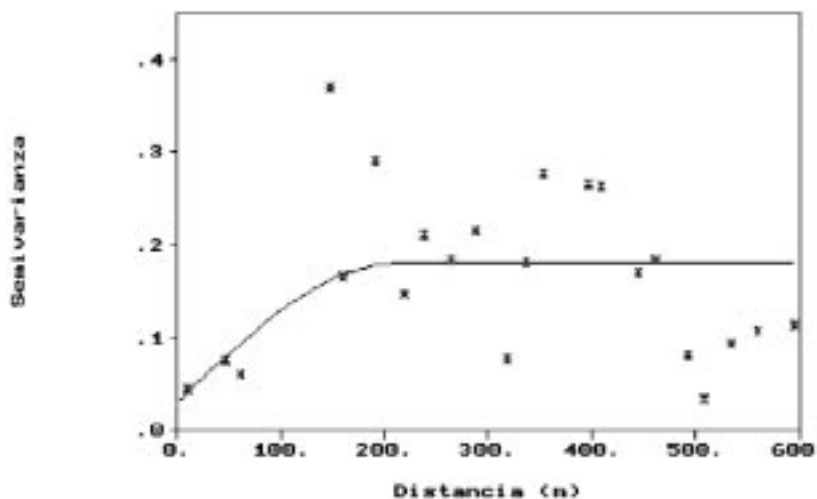


FIGURA 3. Semivariograma para Ks (modelo esférico, pepita=0.03, meseta=0.15 y alcance =230).

Puede interpretarse entonces que para tener una mejor idea de la variabilidad de Ks se debió realizar un muestreo más intenso a menor distancia del planteado en el muestreo anidado. A pesar de ello Bodet (1999) encontró que la mejor distancia de muestreo fue de 12 metros, aunque también sus cálculos estadísticos mostraron un alto coeficiente de variación. Un comportamiento similar muestra el resto de las variables mostrando diver-

sos valores de pepita (fig. 4 y 5), como la densidad aparente determinada por el método del hoyo, a excepción de la sorptividad (fig. 6 y 7) el semivariograma teórico que más ajustó los datos fue un “pepita puro”, lo que significa que la variable tiene un comportamiento irregular y quizás discontinuo, y parte de su estructura de variabilidad espacial se concentra a distancias más cortas que las observadas.

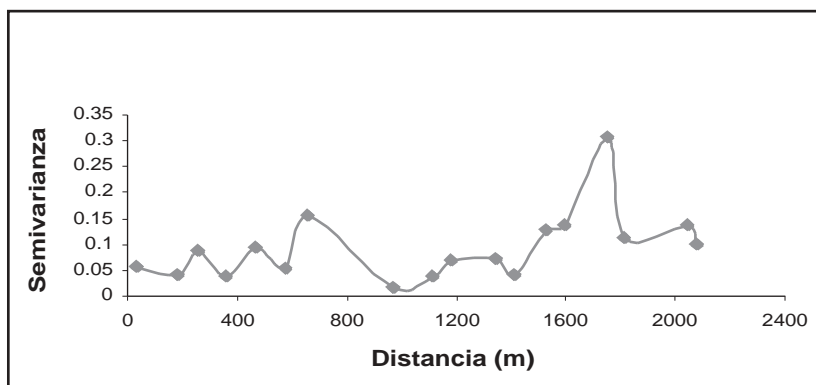


FIGURA 4. Semivariograma muestral para la densidad aparente determinada por el método del hoyo

En este sentido Oliver y Webster (1986) indican que, de los resultados de un muestreo anidado y lineal (en transecto), toda la variabilidad espacial de las propiedades físicas ocurre a distancias cortas y que a mayores intervalos de muestreo la variabilidad espa-

cial de dichas propiedades era más compleja, sin correlación. En nuestro caso la distancia entre los dos sitios de muestreo se encuentra mas allá de los 1000 metros, por lo que la escala de variación se hace mayor y no es detectada por los semivariogramas.

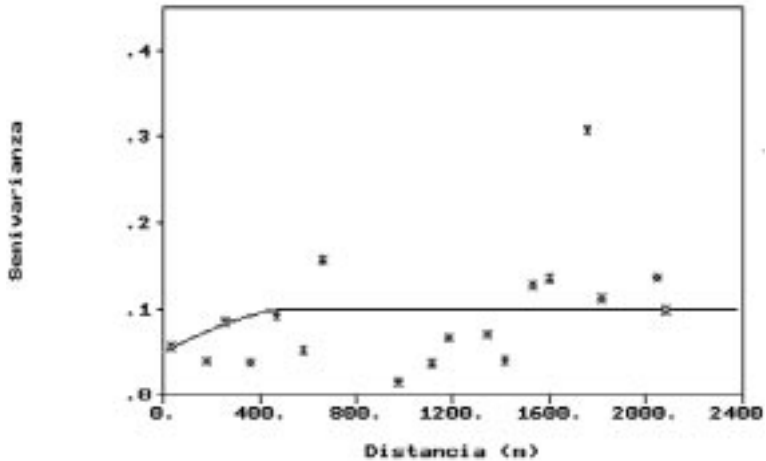


FIGURA 5. Semivariograma teórico para densidad aparente método hoyo (modelo esférico; pepita = 0.05; meseta = 0.05; alcance = 550)

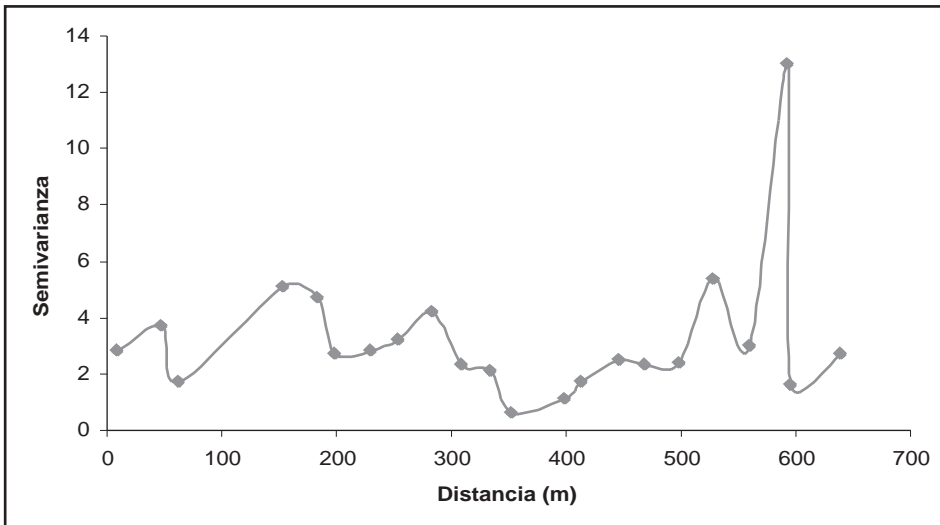


FIGURA 6. Semivariograma muestral para la Sorptividad

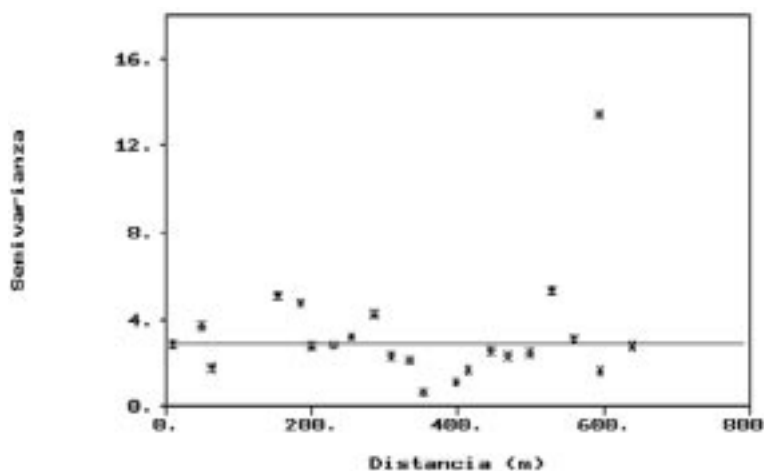


FIGURA 7. Semivariograma teórico para la sorptividad (modelo pepita puro)

La tabla 6 muestra un resumen de las partes de los semivariogramas teóricos calculados para las diferentes variables estudiadas, donde se pueden observar los diferentes valo-

res de pepita, meseta y alcances. Es importante decir aquí que el alcance promedio de todas las variables es aproximadamente 300 metros.

TABLA 6. Resumen de los valores de los semivariogramas teóricos para todas las variables estudiadas en la Rasa de Cogulers (El Solsonès)

Variable	Pepita	Meseta	Alcance (m)
Profundidad efectiva del suelo (cm)	22	26	350
Profundidad del horizonte orgánica (cm)	8	3	90
Pedregosidad en volumen (%)	22	30	80
Densidad aparente (método del hoyo, Mg/m ³)	0.08	0.085	650
Densidad aparente (método del cilindro, Mg/m ³)	0.01	0.114	750
Porosidad total (derivada Da del cilindro, %)	100	210	300
Porosidad total (derivada Da del hoyo, %)	240	17	300
Agua retenida a 33 kPa (%)	0	100	320
Agua retenida a 1500 kPa (%)	47	8	180
Capacidad de retención de agua disponible (CRAD, %)	20	8	180
Conductividad hidráulica saturada (mm/h)	0.03	0.15	230
Sorptividad (cms ^{-1/2})	3	0.00	190

CONCLUSIONES

Partiendo de la base de unidades cartográficas homogéneas, los bajos valores de correlación obtenidos entre las propiedades físicas medidas muestran que no hay una sola

propiedad que tipifique las dos unidades de suelo estudiadas.

El análisis de las componentes principales indica que son necesarias cinco componentes para explicar la variabilidad en dichas unidades. Ellas están referidas principalmen-

te a la relación de la capacidad de almacenamiento de agua disponible en el suelo en función de la densidad aparente y el volumen poroso del suelo.

De acuerdo al análisis discriminante se ha encontrado una relación entre las propiedades medidas, destacándose profundidad efectiva del suelo, la porosidad total derivada de la densidad aparente método del cilindro, la profundidad del horizonte orgánico y, por último, la conductividad hidráulica saturada. Éstas pueden ser utilizadas para la separación de unidades cartográficas homogéneas con comportamiento hidrológico diferente en los suelos del área mediante distancias de 30 y < 12 metros respectivamente.

Los semivariogramas obtenidos ajustados al modelo esférico sugieren que existe una menor variabilidad a distancias cortas, que corresponden a menos de 300 m en el conjunto de datos de las dos unidades.

A pesar de que el muestreo anidado con 48 muestras ha permitido construir e interpretar los semivariogramas, para mejorar la explicación del comportamiento de las propiedades estudiadas, determinar con certeza su variabilidad espacial y lograr semivariogramas estables sería necesario, probablemente, aumentar el número de muestras.

REFERENCIAS

- Bodet, A. (1999). Aplicació del mètode de mostreig en etapes i anàlisi geoestadística a les propietats físiques del sòls de la Rasa de Cogulers (El Solsonès). Universitat de Lleida. España.
- Estruch, J. (1999): Informació del territori i càlcul de l'escolament superficial mitjançant el model HEC-1. Aplicació al mapa de sòls 1:50.000 de la Conca de Canalda (El Solsonès). Universitat de Lleida. España
- Giménez, D., Rawls, W.J., Lauren, J.G. (1999): Scaling properties of saturated hydraulic conductivity in soil, *Geoderma* 88, 205-220.
- Klecka, W.R. (1980): Discriminant analysis, Sage Paper Series on Quantitative Application in the Social Sciences. Series. No 07-019 Beverly Hills, Sage Publications.
- López, F.R. (1999): Suelos pedregosos. Características que afectan la calidad edáfica. Importancia y conocimiento en Venezuela. En: Suelos Pedregosos, R. López Falcon y F. Delgado Espinoza (eds). Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. Venezuela, 1-18.
- Moosegar A., Warrick A.W. (1986): Hydraulic conductivity of saturated soil: field method. En: Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods, Agronomy Monograph, No 9, 735-768. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 677.
- Naney, J.W., Ahuja, L. R., Barnes, B.B, (1983): Variability and interrelation of soil-water and some related soil properties in a small watershed. Agricultural Research Service, Durant, Oklahoma. USA.
- Oliver M.A., Webster R. (1986): Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables, *Geographic analysis* 18, 3.
- Ovalles, V.F. (1999): Evaluación de tierras en zonas tropicales. Uso de la geoestadística. II curso de Posgrado de Manejo de suelos tropicales. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Universitat de Lleida. España.
- Pla, I. (1999): Características y propiedades de los suelos pedregosos. En: Suelos Pedregosos, R. López Falcon y F. Delgado Espinoza (eds). Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo, Venezuela, 33-39.
- Poesen, J., Lavee, H. (1994): Rock fragments in topsoil: Significance and processes. *Catena*, 23: 1-28.

- Pritchett, W.L. (1991): Suelos Forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial LIMUSA. Grupo Noriega Editores, Mexico, D.F, Mexico.
- Ribes, M. (1996): Estudio de la compactación de suelos sometidos a un proceso de nivelación laser. Tesis doctoral. Universitat de Lleida. España.
- Samper C.F., Carrera R.M. (1996): Geostatística. Aplicaciones a la hidrología subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Catalunya.
- SAS Institute Inc., (1994): SAS/STAT® User's guide, Version 6, Volumen 1 y 2, Fourth Edition. Cary, NC: SAS institute Inc., USA.
- Soil Survey Staff, (1975): Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA, Agriculture handbook No. 436. USA.
- Sparks, A., Englund, E. (1988): GEO-EAS (Geostatistical environmental assessment software) User's guide. Environmental Monitoring Systems Laboratory Office of Research and Development. Las Vegas, Nevada. U.S.A.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S., Uehara, G. (1985): Spatial dependence and interpolation of soil properties in West Sumatra, Indonesia: Anisotropic variation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1391-1395.
- Van Wesemael, B., Poesen, J., Kosmas, C.S., Danalatos N.G., Nachtergaele J. (1996): Evaporation from cultivated soils containing rock fragments. *J. Hydrology* 182, 65-82.