

OPTIMIZACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MUESTREO EN CAMPOS ABANDONADOS MEDIANTE FUNCIONES VARIOGRAMAS.

J.F. Martínez Murillo, J.D. Ruiz Sinoga
Departamento de Geografía, Universidad de Málaga. jfmmurillo@uma.es

Resumen. Optimización de la estrategia de muestreo en campos abandonados mediante funciones variogramas.

Los campos abandonados en la montaña mediterránea suelen verse afectados por la degradación del suelo y la erosión hídrica. Su sistema ecogeomorfológico es de gran variabilidad espacio-temporal y su resiliencia depende del clima y de la degradación edáfica en el momento del abandono. Esta degradación depende de factores locales por lo que la variabilidad espacial del proceso es muy elevada. Las funciones variogramas permiten conocer dicha variabilidad y la correlación espacial entre las variables y mejorar la estrategia de muestreo según dichos factores locales.

Abstract. Soil sampling strategy optimization in abandoned fields through variogram functions.

Abandoned fields in Mediterranean mountains are usually affected by soil degradation and water erosion. Their ecogeomorphologic system is very variable in space and time and their resilience depends on climate and soil degradation at the abandon. Soil degradation is related to local factors, hence process is very variable in space. Variogram function allows to determine this variability and the spatial correlation between the factors improving the soil sampling strategy.

1. INTRODUCCIÓN.

Desde finales del siglo XIX, y más recientemente, a mediados del siglo XX, ha tenido lugar un proceso casi continuo de abandono del campo en zonas marginales por la entrada en crisis de la actividad agrícola, y de la economía natural agraria (NAREDO, 1996: 24). Los efectos del abandono del campo sobre la calidad de las tierras son muy diversos, dependiendo de las condiciones climáticas y del estado de los suelos, muy variable desde el punto de vista espacio-temporal, dependiendo de las características ecogeomorfológicas del lugar y se genera una gran variedad de situaciones, de ahí la dificultad de predecir la evolución futura de los campos abandonados (LASANTA et al., 1995: 311; KOSMAS et al., 2000: 3). BERGKAMP (1998: 201) indica que tras el uso humano del suelo, el sistema natural puede recuperar las condiciones previas a la actividad, iniciándose procesos de recuperación de la cubierta vegetal como acabamos de apuntar; esta capacidad de recuperación ha sido denominada como resiliencia. Dentro del paisaje mediterráneo, el suelo y las condiciones hidrológicas, sobre todo la disponibilidad de agua, importantes para la recuperación de la vegetación, varían espacialmente. A causa de esta falta de uniformidad del paisaje, es poco común que la resiliencia del geo-ecosistema sea continua, por lo que es más que posible que coexistan unidades fisiográficas en proceso de degradación y otras en proceso de recuperación. El geo-sistema parece tener una capacidad de resiliencia mayor si la exposición es a umbría que a solana, a escala de ladera. En las zonas más degradadas, la resiliencia es mayor en

la sección baja de la ladera porque la distancia a los recursos hídricos así como la incidencia de la radiación solar, que controla la evapotranspiración, es menor.

Debido a la orografía y geología de muchas de las áreas geográficas caracterizadas por la masiva presencia de campos abandonados, como por ejemplo, las Cordilleras Béticas, esta dinámica descrita en los párrafos anteriores tiene una elevada implicación hidrológica y erosiva. Esto es así porque buena parte de los cursos fluviales que recorren dicho ámbito geográfico tienen su origen en cabeceras de cuenca, ocupadas por campos abandonados, cuya respuesta hidrológica y erosiva es difícil de modelizar dada la elevada variabilidad espacial y temporal de los factores que la controlan (MARTINEZ-MURILLO y RUIZ-SINOVA, 2007: 81; RUIZ-SINOVA y MARTÍNEZ-MURILLO, 2009a: 243). Es por ello que es necesario efectuar investigaciones a escala de detalle en los campos abandonados y analizar aquellos factores que controlan esa respuesta hidrológica y erosiva, como ya se ha venido realizando durante las últimas décadas (CERDÁ, 1998: 669; GARCÍA-RUIZ et al., 199: 305; PUIGDEFÁBREGAS et al., 1999: 67; CALVO-CASES et al., 2003: 268). Entre otros factores a analizar son claves los de índole edáfica como los contenidos de arcilla y de materia orgánica y la estabilidad de los agregados (LAVEE et al., 1998: 229). Pero se trata de variables que pueden cambiar muy rápidamente en el espacio, especialmente, en ambientes semiáridos donde la cubierta vegetal no es continua, sino que se dispone en teselas o parches (KATRA et al., 2007: 365; RUIZ-SINOVA y MARTÍNEZ-MURILLO, 2009b: 359). Para alcanzar un mayor éxito en este tipo de investigaciones, es necesario definir una adecuada estrategia de muestreo del suelo considerando las variables ambientales locales (DE GRUTJIER et al., 2006: 28).

En este sentido, la aplicación de técnicas geoestadísticas resulta útil y mejora la eficiencia de la investigación. La Geoestadística puede considerarse como una metodología de naturaleza topoprobabilística adaptada a la cuantificación de variables espaciales y tiene su base conceptual en la teoría de variables regionalizadas (MATHERON, 1971: 14), es decir, variables que presentan una distribución espacial y una estructura de correlación o variabilidad espacial (CHICA OLMO, 1987: 23). Esta correlación espacial se analiza por medio del variograma, que es una función vectorial cuyo argumento es el vector h de distancia, que cuantifica la varianza de los incrementos cuadráticos de primer orden de la función. Tiene un interés práctico muy importante ya que del análisis espacial de esta función se puede llegar al conocimiento de la variabilidad espacial de un determinado parámetro en función de la distancia; es por tanto, una herramienta reveladora de la estructura de variación de un fenómeno que se desarrolla en el espacio permitiendo, entre otras cosas, optimizar la estrategia de muestro del suelo.

Este es, por tanto, el objetivo de este trabajo: optimizar la estrategia del muestreo del suelo en campos abandonados y en condiciones climáticas diferentes, a fin de mejorar el estudio de los factores que controlan sus respuestas hidrológicas y erosivas.

2. METODOLOGÍA.

2.1. Áreas experimentales.

Las áreas experimentales se localizan en las Cordilleras Béticas en el sur de España, en pequeñas cabeceras de cuenca (Figura 1). Todas ellas difieren en el régimen pluviométrico, pero comparten los rasgos topográficos (pendiente media $>20\%$),

geológicos (rocas metamórficas: filitas, esquistos) y de uso del suelo (campo abandonado con pastoreo extensivo). Se trata de un acercamiento desde el método de transecto climático que permite comparar sitios con semejantes rasgos topográficos, geológicos y de uso del suelo, pero difiriendo en el régimen climático (IMESON y LAVEE, 1998: 321).

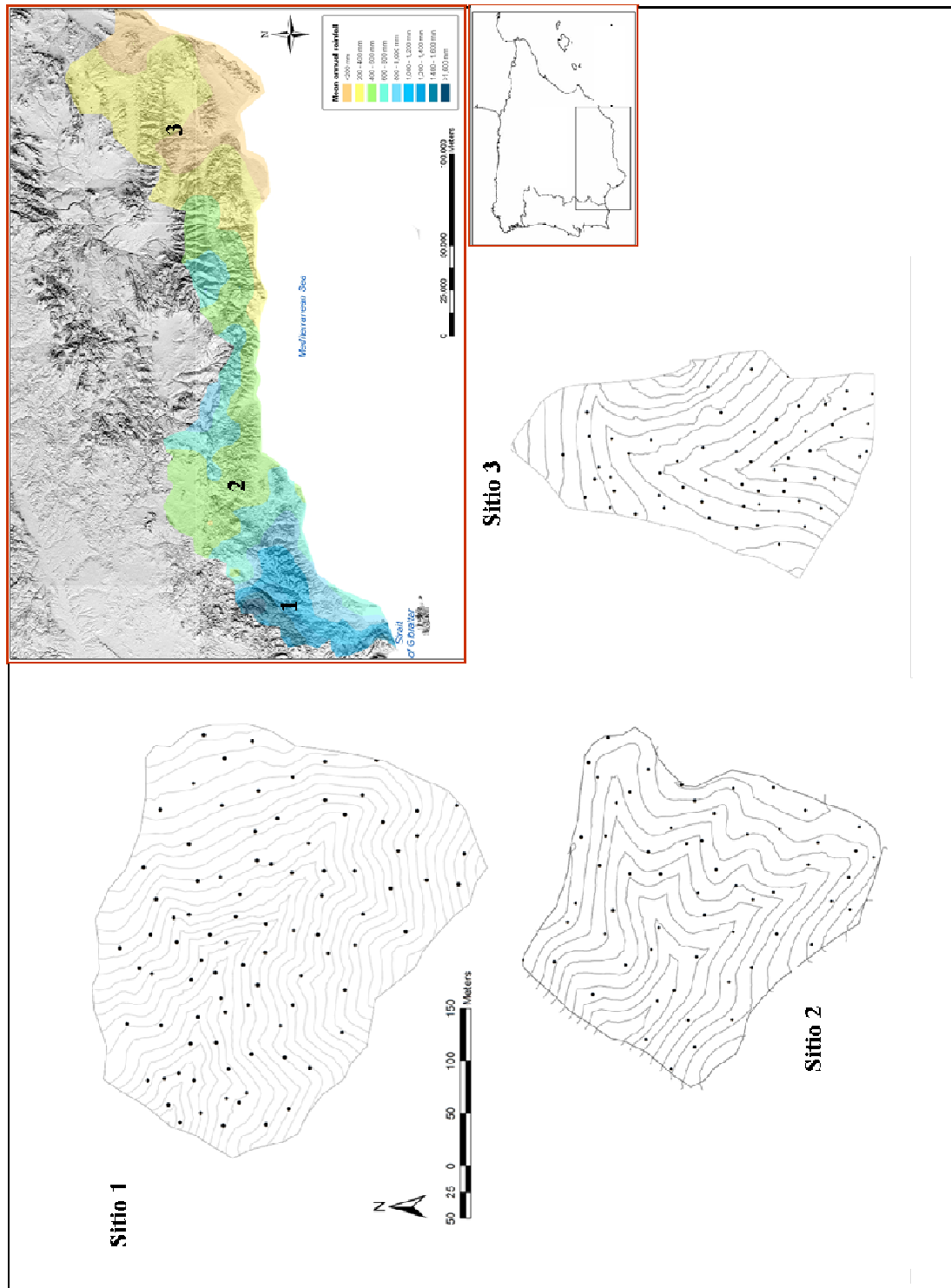


Figura 1. Localización de las áreas de estudio y detalle de las áreas experimentales con

los puntos de muestreo del suelo (puntos negros). Línea continua: curvas de nivel.

El área experimental Sitio 1 (Gaucín) se sitúa en la Serranía de Ronda. Su superficie es de 8,2 ha. La topografía es montañosa y el sustrato geológico corresponde a filitas paleozoicas. El uso del suelo corresponde a campo abandonado, recolonizado por especies vegetales arbóreas (*Quercus pirenaica* y *Quercus suber*) y arbustivas (*Pistacia lentiscus*, *Erica arbórea*, *Cistus salvifolius* y *Lavandula stoechas*, principalmente), afectado por pastoreo extensivo vacuno y caprino. El clima es mediterráneo de régimen húmedo (P anual: 1.010 mm/año; T anual: 14,5°C). El área experimental Sitio 2 (Almogía) se localiza en los Montes de Málaga y comparte con el Sitio 1 topografía, geología y uso del suelo, si bien las especies vegetales son algo diferentes debido a unas precipitaciones menos abundantes (*Quercus suber*, *Quercus coccifera*, *Cistus albidus*, *Cistus monspeliensis*, *Retama sphaerocarpa*, *Lavandula stoechas*, *Helychrisum stoechas* y *Genista umbellata*); el pastoreo es también extensivo y caprino. El clima es mediterráneo de régimen seco (P anual: 601 mm/año; T anual: 16,0°C). Su superficie es de 7,8 ha. Por último, el área experimental Sitio 3 (Gérgal) se localiza en la vertiente sur de la Sierra de los Filabres y cuya topografía es también montañosa pero el sustrato geológico son esquistos paleozoicos. Su superficie es de 6,5 ha. Se trata también de un campo abandonado, con pastoreo extensivo ovino, recolonizado por especies vegetales mediterráneas (*Retama sphaerocarpa*, *Stipa tenacissima*, *Lavandula stoechas* y *Thymus baeticus*), adaptadas a un clima mediterráneo semiárido (P anual: 335,9 mm/año; T anual: 12,1°C). Las tres áreas experimentales se abandonaron en la década de los años cincuenta del siglo XX.

2.2. Muestreo del suelo y análisis de laboratorio.

En cada una de las áreas experimentales y en función de la superficie a muestrear, se llevó a cabo un muestreo aleatorio simple, localizando los puntos de muestreo usando la herramienta para tal efecto del software ArcGIS 9.3 (licencia corporativa de la Universidad de Málaga). El número de muestras tomadas fueron 90, 60 y 60 en los sitios 1, 2 y 3, respectivamente. Las muestras de suelo, alteradas, se tomaron en superficie (0-5 cm de profundidad). Una vez en el laboratorio, se secaron las muestras a unos 22°C durante 4-5 días para que perdieran la humedad. Tras este secado se tamizaron a 2 mm para separar la fracción fina de la gruesa. La fracción fina fue utilizada para analizar el contenido de arcillas (método de pipeteado de Robinson), la estabilidad de agregados (método de tamizado en húmedo) y el contenido en materia orgánica (método AFNOR dicromato y espectrofotometría).

2.3. Análisis estadístico y funciones variogramas.

Se calcularon las medias y las desviaciones estándar para los datos de las propiedades de los suelos analizadas. Previamente a la aplicación de las funciones variogramas, como los datos estaban expresados en porcentajes, estos fueron transformados aplicando la transformación angular, descrita por la ecuación:

$$\alpha = \arcsen \sqrt{p}$$

, siendo p la proporción o porcentaje a transformar.

Las variables edáficas georreferenciadas (o variables regionalizadas) se representan mediante una función variograma, que se define como una función aleatoria intrínseca que representa la mitad de los incrementos cuadráticos medios de la variable para puntos distantes el vector de distancia h . La estimación de la función

variograma a partir de los datos experimentales se efectúa aplicando la fórmula clásica (CHICA OLMO, 1995: 590):

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

Donde $z(x_i)$ y $z(x_{i+h})$ son valores numéricos de la variable observados en los puntos x_i y x_{i+h} ; $NP(h)$ es el número de parejas de datos formados para una distancia h y h es el vector de la distancia.

Las funciones variogramas fueron obtenidos mediante el uso del paquete Geostatistical Analyst de ArcGIS 9.3 (licencia corporativa de la Universidad de Málaga).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Análisis del suelo.

Los resultados de los análisis de las propiedades del suelo reflejan la degradación del sistema eco-geomorfológico conforme las condiciones climáticas se hacen más secas a lo largo del gradiente de precipitación (Tabla 1). Tanto los contenidos de arcillas y de materia orgánica, como la estabilidad de los agregados >2 mm del suelo en superficie, decrecen desde el Sitio 1 (clima mediterráneo húmedo) al Sitio 3 (clima mediterráneo semiárido). Especialmente significativo, es el descenso de la estabilidad estructural del suelo, que se reduce casi a la mitad en el Sitio 3 (Gérgal, semiárido), consecuencia de la reducción tanto de las arcillas, como de la materia orgánica (CERDÀ, 1996: 138; P. SARAH, 2005: 9). Esto da idea de la precariedad del sistema eco-geomorfológico y su vulnerabilidad frente a procesos de degradación del suelo, como por ejemplo la erosión hídrica y la desertificación (LAVEE et al., 1998: 228).

Tabla 1. Valores medios (M) y desviación estándar (SD) de las propiedades del suelo analizadas. N: número de muestras.

	N	Arcillas (%)		Estabilidad de agregados (%)		Materia orgánica (%)	
		M.	SD	M.	SD	M.	SD
Sitio 1	90	23,6	4,0	80,4	14,3	9,5	3,3
Sitio 2	60	20,7	4,1	74,8	18,2	6,7	3,5
Sitio 3	60	14,3	3,0	55,7	20,7	1,8	1,4

3.2. Funciones variogramas

La Figura 2 representa las funciones variogramas obtenidas para cada una de las propiedades del suelo analizadas, a partir de la aplicación de un modelo de tipo esférico. En cada área experimental, el modelo se aplicó teniendo en cuenta la orientación general de las laderas de las cabeceras de cuenca: Sitio 1, N20°; Sitio 2, N10°; y Sitio 3, N90°. Esto permite asumir la premisa básica de que los contenidos de arcillas y de materia orgánica, y por tanto de la estabilidad de los agregados, aumenta ladera abajo debido a los arrastres que conlleva la escorrentía superficial.

En todas las áreas experimentales, la correlación espacial de las variables edáficas se reduce rápidamente, lo que se evidencia en la falta de ajuste entre la función

variograma (indicada por una línea azul en los gráficos) y la nube de puntos.

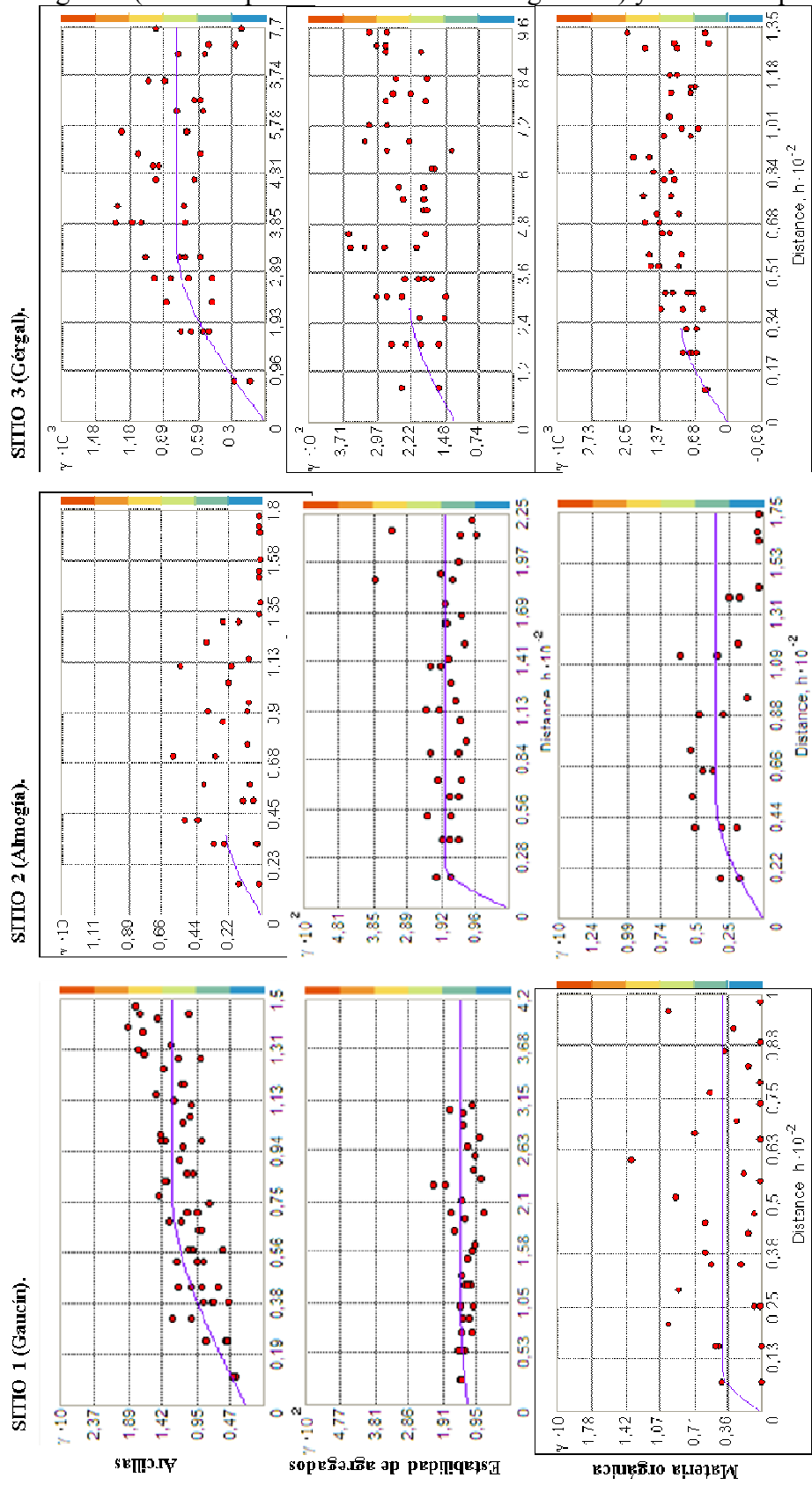


Figura 2. Variogramas de las propiedades del suelo analizadas en las áreas

experimentales.

Con el tipo de muestreo realizado, los ajustes son en general mejores en el Sitio 3, principalmente para el contenido de arcillas y de materia orgánica. En Sitio 1, es el contenido de arcillas el que obtiene mejor ajuste. Y en el Sitio 2, ninguna de las tres variables obtiene un ajuste significativo, evidenciando una alta variabilidad espacial.

Es destacable el rango de amplitud espacial empleado para obtener estos ajustes, es decir, la distancia máxima usada para incluir puntos de muestreo vecinos. En los Sitio 1, 2 y 3, los rangos son iguales a 15, 40, 35 m para las arcillas, a 35, 25 y 30 m para la estabilidad de los agregados, y a 10, 50 y 35 m para la materia orgánica, respectivamente. Estos resultados indican que para obtener buenos resultados de muestreo en los sitios húmedos y semiáridos, no es necesario abarcar una gran superficie de muestreo a fin de conseguir una representación idónea de la variabilidad espacial del contenido de arcillas y de materia orgánica en la superficie del suelo, dado que la variabilidad de ambas puede ser muy alta. No es el caso de la estabilidad de los agregados, propiedad edáfica más variable si cabe por ser una propiedad resultado de la conjunción de varios factores bióticos y abióticos. Puede decirse también que es en el Sitio 2, el que se encuentra en unas condiciones climáticas intermedias o de ecotono entre el mediterráneo húmedo y el mediterráneo semiárido de las Cordilleras Béticas, el área experimental donde la variabilidad es mayor y la estrategia de muestreo ha de ser diferente a la aplicada, dados los bajos ajustes entre las funciones variogramas y los datos obtenidos en los análisis de suelo.

Dado que se trata de campos abandonados donde la cubierta vegetal no es del todo uniforme, especialmente en el Sitio 3 (Gérgal, semiárido), pero también en las laderas de solana de los camps del Sitio 1 (Gaucín, húmedo) y Sitio 2 (Almogía, seco), la variabilidad espacial que pueden tomar las propiedades del suelo es muy elevada. Esto explica la rápida caída de la correlación espacial de las propiedades analizadas, muy influidas por las condiciones eco-geomorfológicas del punto de muestreo (RUIZ-SINOGA y MARTÍNEZ-MURILLO, 2009c: 242; RUIZ-SINOGA y ROMERO-DÍAZ, 2010: 367). Por ello, el muestreo, además de tener presente el propósito, debe tener en consideración todas estas variables y variabilidad espacial.

4. CONCLUSIONES.

La aplicación de las funciones variogramas para la optimización del muestreo del suelo en campos abandonados ha resultado ser un método adecuado, permitiendo discernir los errores del muestreo aleatorio simple aplicado a priori. Especialmente, han de ser tenidos en cuenta los resultados de las funciones variogramas en el campo abandonado en condiciones climáticas mediterráneas de régimen seco, en transición entre los húmedos y semiáridos, debido a una mayor variabilidad de sus elementos bióticos y abióticos en su sistema eco-geomorfológico. No obstante, en los otros dos campos abandonados, también debe ponerse especial precaución en la optimización de la estrategia de muestreo puesto que los ajustes obtenidos en las funciones no son excesivamente buenos. Por tanto, elementos como la pendiente del terreno, la orientación o la cubierta vegetal deberían ser incorporados a la función variograma mediante el empleo de técnicas geoestadísticas más avanzadas como el ko-kriging.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGKAMP, G. (1998): «A hierarchical view of interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands», *Catena*, n. 33, p. 201-220.

CALVO, A., BOIX, C. y IMESON, A.C. (2003): «Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous (limestone) slopes of some Mediterranean environments in Southeast Spain», *Geomorphology*, n. 50, p. 269-291.

CERDÀ, A. (1996): «Soil aggregate stability in three Mediterranean environments», *Soil Technology*, n. 9, p. 133-140.

CERDÀ, A. (1998): «The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope», *Hydrological Processes*, n. 12, p. 661-671.

CHICA OLMO, M. (1986): «El Krigeaje de isoyetas. Actas del II Simposio sobre el Agua en Andalucía», Granada, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Granada, p. 589-600.

CHICA OLMO, M. (1987): Análisis geoestadístico en la explotación de los recursos naturales, Granada, Tesis doctoral, Universidad de Granada, 387 p.

DE GRUIJTER, J., BRUS, D., BIERKENS, M. y KNOTTERS, M. (2006): *Sampling for Natural Resource Monitoring*, The Netherlands, Springer-Verlag, 252 p.

GARCÍA RUIZ, J.M., LASANTA, T., GONZÁLES, C., WHITE, S., ORTIGOSA, L. y RUIZ-FLAÑO, P. (1995): «Changes in runoff and erosion as a consequence of land-use changes in the Central Spanish Pyrenees», *Physic and Chemistry of the Earth*, n. 20, p. 301-307.

KATRA, I., BLUMBERG, D.G., LAVÉE, H. y P. SARAH. (2007): «Topsoil moisture patterns on arid hillsides – Micro-scale mapping by thermal infrared images», *Journal of Hydrology*, n. 334, p. 359-367.

KOSMAS, C., DANALATOS, N.G. y GERONTIDIS, S. (2000): «The effect of land parameters on vegetation performance and degree of erosion under Mediterranean conditions», *Catena*, n. 40, p. 3-17.

IMESON, A.C. y LAVÉE, H. (1998): «Soil erosion and climate change: the transect approach and the influence of scale», *Geomorphology*, n. 23, p. 319-337.

LASANTA, T., PÉREZ RONTOMÉ, C., GARCÍA RUIZ, J.M., MACHÍN, J. y NAVAS, A. (1995): «Hydrological problems resulting from farmland abandonment in semi-arid environments: the Central Ebro Depression», *Physic and Chemistry of the Earth*, n. 20, p. 309-314.

LAVÉE, H., IMESON, A.C. y SARAH, P. (1998): «The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean-arid transect», *Land Degradation and Development*, n. 9, p. 218-230.

MARTÍNEZ MURILLO, J.F. y RUIZ SINOGA, J.D., 2007. «Seasonal changes in the hydrological and erosional response of a hillslope under dry-Mediterranean conditions (Montes de Málaga, South of Spain)», *Geomorphology*, n. 88, p. 69-83.

MATHERON, G. (1971): *The theory of regionalized variables and its applications*, Fontainebleau, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 211 p.

NAREDO, J. M. (1996): *La evolución de la agricultura en España (1940-1990)*, Granada, Universidad Granada.

PUIGDEFÁBREGAS, J., SOLÉ, A., GUTIÉRREZ, L., DEL BARRIO, G. y BOER, M. (1999): «Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain», *Earth-Science*

Reviews, n. 48, p. 39-70.

RUIZ SINOGA, J.D., y MARTÍNEZ MURILLO, J.F. (2009a). «Effects of soil surface components on soil hydrological behavior in a dry Mediterranean environment (Southern Spain)», *Geomorphology*, n. 108, p. 234-245.

RUIZ-SINOGA, J.D., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F. (2009b): «Eco-geomorphological system response variability to the 2004–06 drought along a climatic gradient of the Littoral Betic Range (southern Spain)», *Geomorphology*, n. 103, p. 351-362.

RUIZ SINOGA, J.D., y MARTÍNEZ MURILLO, J.F. (2009c): «Effects of soil surface components on soil hydrological behavior in a dry Mediterranean environment (Southern Spain) », *Geomorphology*, n. 108, p. 234-245.

RUIZ SINOGA, J.D., ROMERO DÍAZ, A. (2010): «Soil Degradation Factors along a Mediterranean Pluviometric Gradient in Southern Spain», *Geomorphology*, n. 118, p. 359-368.

SARAH P. (2005): «Soil aggregation response to long- and short-term differences in rainfall amount under arid and Mediterranean climate conditions», *Geomorphology*, n. 70, p. 1-11.