

PERSISTENCIA VERSUS GRADO DE REPELENCIA: UN ESTUDIO COMPARATIVO DE DOS MÉTODOS DE MEDIDA DE HIDROFOBICIDAD

C. M. Regalado, A. Ritter

Instituto Canario Investigaciones Agrarias (ICIA), Dep. Suelos y Riegos, Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife, cregalad@icia.es.

RESUMEN. En general los suelos muestran en diferente medida un cierto grado de hidrofobicidad o repelencia al agua con importantes implicaciones hidrológicas para el comportamiento de la Zona No Saturada. Los tests WDPT, de las siglas inglesas “*water drop penetration time*”, y MED “*molarity of an ethanol droplet*” son ampliamente utilizados para la caracterización de la repelencia en suelos. Mientras que el primero caracteriza la persistencia en hidrofobicidad, como tiempo que tarda en infiltrar una gota de agua desde la superficie del suelo, el segundo proporciona una medida del grado de repelencia, en términos del ángulo de contacto o energía libre superficial de las partículas de suelo. El test WDPT se considera ‘hidrológicamente’ más cercano al proceso natural de infiltración de agua en el suelo, pero los tiempos de infiltración se vuelven prohibitivos (>8 h) en suelos con una repelencia elevada, resultando más ventajoso entonces la aplicación del test MED. En este trabajo se utilizan técnicas geostatísticas de *cokriging* para mejorar la interpolación espacial de medidas de repelencia realizadas con el test WDPT, haciendo uso de parámetros derivados a partir del test MED en una cuenca forestal del Parque Nacional de Garajonay (La Gomera).

ABSTRACT. Soil water repellency is recognized as being a widespread phenomenon, which may affect a wide range of possible hydrological processes taking place in the vadose zone. The water droplet penetration time (WDPT) and molarity of an ethanol droplet (MED) tests are often used to characterize soil repellency. While the former measures repellency persistency, in terms of the infiltration time of a water drop lying on the soil surface, the latter quantifies the repellency degree as contact angle or surface free energy of the soil solid particles. The WDPT test is considered to be, from a hydrological point of view, closer to the natural infiltration process of soil, but the infiltration times become prohibitively large (>8 h) in highly repellent soils, so that the use of the MED test is more convenient. In this study, *cokriging* Geostatistical tools were applied to improve spatial interpolation of repellency WDPT measurements, using repellency parameters derived from the MED test in a forested watershed of the Garajonay National Park (La Gomera, Canary Islands, Spain).

1.- Introducción

El fenómeno de repelencia está presente en menor o mayor grado en casi todo los suelos (Wallis y Horne, 1992), afectando a procesos hidrológicos que intervienen en la Zona No Saturada tan variados como la curva de retención de agua (DiCarlo, 1999; Bauters et al., 2000), la conductividad hidráulica (Wallis et al., 1990; van Dam et al., 1996), el agua disponible (Scott y van Wyk, 1990), el flujo preferencial (Jaminson, 1945; Ma’shum y Farmer, 1985; Wallis y Horne, 1992) o fenómenos de erosión (Shakesby et al., 1994).

Se han propuesto diferentes métodos para caracterizar el grado de repelencia en un suelo (Wallis y Horne, 1992; Letey et al., 2000). Para suelos débilmente hidrófugos los métodos de elevación capilar (Letey et al., 1962), el infiltrómetro de tensión (Tillman et al., 1989) y la placa de Wilhelmy (Bachmann et al., 2004) permiten medir repelencia subcrítica (Tillman et al., 1989). En suelos moderadamente repelentes los tests que están ampliamente extendidos por su simplicidad son el MED, de las siglas inglesas “*molarity of an ethanol droplet*” (Roy y McGill, 2002), y el WDPT, de las siglas inglesas “*water drop penetration time*” (Wallis y Horne, 1992; Letey et al., 2000). La principal ventaja del test MED es su rapidez (del orden de minutos), en comparación con el de WDPT que puede tardar desde pocas horas a días, especialmente en suelos muy repelentes (Wallis y Horne, 1992). El test MED además proporciona información sobre propiedades físicamente relevantes del suelo, tales como el ángulo de contacto o la energía libre superficial de las partículas de suelo (Carrillo et al., 1999). Sin embargo, en ocasiones se opta por el test WDPT, debido a que en cierta medida su metodología recuerda al fenómeno de infiltración natural de agua en la Zona No Saturada, por lo que desde un punto de vista hidrológico parece más relevante. Pocos trabajos han comparado sin embargo ambos tests (Wallis et al., 2001; Douglas et al., 2005) y ninguno desde un punto de vista de su variación espacial utilizando herramientas de análisis como la geostatística (Nielsen y Wendroth, 2003).

Con respecto a este último aspecto, Hallet et al. (2004) observaron una cierta estructura espacial repelente (referida como sortividad de etanol) a escalas <50 mm, medida con un infiltrómetro miniaturizado. Moral (1999) analizó los semivariogramas de la repelencia en suelos arenosos del Parque Nacional de Doñana, encontrando ciertas evidencias de estructura espacial en la mayoría de las parcelas seleccionadas. Jaramillo (2004) estudió la variación espacial

de parámetros supuestamente relacionados con la repelencia en Andisoles de la región de Antioquia. Recientemente, Regalado y Ritter (2006) describieron la variación espacial de parámetros que caracterizan la repelencia derivados a partir de medidas con el test MED en una cuenca forestal del Parque Nacional de Garajonay.

El estudio de la repelencia se complica aún más si tenemos en cuenta que ésta varía de forma no lineal con el contenido en humedad del suelo, θ_g (King, 1981; Wallis et al., 1990; Berglund y Perrson, 1996; de Jonge et al., 1999; Goebel et al., 2004). En general los suelos son humectables a saturación, volviéndose repelentes a medida que su contenido en humedad disminuye hasta alcanzar un máximo de repelencia. A partir de este máximo la repelencia disminuye de forma monotónica o aumenta de nuevo hasta un segundo máximo local (de Jonge et al., 1999; Goebel et al., 2004). El origen de este comportamiento no-lineal es desconocido, aunque se han propuesto varias hipótesis para explicarlo (Roberts y Carbon, 1971; Jex et al., 1985; Wallis et al., 1990; Doerr y Thomas, 2000; Doerr et al., 2002; Goebel et al., 2004). Para describir este comportamiento no lineal Regalado y Ritter (2005) han propuesto recientemente una estrategia óptima de caracterización de la repelencia, proponiendo parámetros que cuantifican la dependencia de la hidrofobicidad con el contenido de humedad. Así por ejemplo, el área debajo de la curva de repelencia (S) y el contenido de humedad de suelo al cual se inicia el carácter hidrófugo, θ_{g-min} , se proponen como parámetros de utilidad para describir el comportamiento no humectante de un suelo (Regalado y Ritter, 2005).

Existen técnicas avanzadas de Geostadística, como el *cokriging*, cuya finalidad es la interpolación espacial de una variable primaria Z utilizando información suplementaria de otra secundaria Z_2 con la que está correlacionada y que ha sido medida más densamente que Z , generalmente porque resulta más fácil de estimar (Nielsen y Wendroth, 2003). De esta forma la interpolación espacial de la variable primaria mejora considerablemente. En este trabajo se utilizan técnicas de *cokriging* para interpolar el área debajo de la curva de repelencia medida con el test WDPT, S_{WDPT} , utilizando como variable secundaria S_{MED} o θ_{g-min} (determinado por ambos tests), parámetros con los que S_{WDPT} está correlacionada y que resultan de más fácil medición. El objetivo que por tanto nos planteamos es, en consonancia con trabajos anteriores (Regalado y Ritter, 2005; 2006), diseñar una estrategia de interpolación de la repelencia con un número mínimo de medidas que además resulten relevantes desde un punto de vista hidrológico para la Zona No Saturada. El estudio que presentamos en este artículo se realizó en una cuenca forestal de laurisilva del Parque Nacional de Garajonay (La Gomera).

2.- Materiales y métodos

2.1. Diseño del muestreo

Se realizó un muestreo sobre una malla regular de 100 x 75 m con 56 puntos de intersección, más cuatro submallas a pequeña escala adicionales con 21 puntos de intersección cada una, elegidas al azar. Esta estructura anidada de muestreo permite caracterizar tanto distancias cortas (mesoescala, cm) como largas (macroescala, m). Los puntos de muestreo se localizaron mediante GPS, con un error de ± 2 m. En total resultaron 140 muestras ($n=56 + 4 \times 21$), tomadas a una profundidad de 0-0.03 m, tras retirar la capa superior de detritus orgánico.

2.2. Determinación de la repelencia

Primeramente se tamizaron las muestras ($n=140$) a 2 mm de forma manual a humedad de campo. Se colocaron luego unos 230 ml de cada muestra en dos placas Petri y se humedecieron desde humedad de campo hasta saturación. En una de las submuestras la repelencia se determinó con el test MED (Roy y McGill, 2002) y se usaron para ello soluciones etílicas de concentraciones: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10% y 12.5 a 100% en pasos de 2.5%. En la segunda submuestra se utilizó el método WDPT (Letey, 1969) para caracterizar la persistencia en repelencia, como el tiempo medio (min) que tardan en infiltrar tres gotas de agua destilada depositadas con una jeringa en la superficie de la muestra de suelo. Las medidas de repelencia se llevaron a cabo en pasos de desorción de unos 3 g de diferencia desde saturación hasta secado en estufa a 105°C, y para al menos 10 humedades de suelo distintas. En los primeros pasos de humedad las muestras se secaron al aire. En los estadíos finales (contenido de humedad, $\theta_g < 0.20 \text{ kg kg}^{-1}$) las muestras se secaron en estufa a 55°C, 60°C y 105°C, para luego dejarlas enfriar antes de aplicar el test MED o WDPT.

2.3. Parámetros que caracterizan la repelencia

De acuerdo con trabajos previos (Regalado y Ritter, 2005) se determinaron los siguientes parámetros que describen la curva humedad de suelo versus repelencia: las pendientes de ascenso (s^+) y descenso ($|s^-|$); el área de integración debajo de la curva (S_{MED} y S_{WDPT}); el máximo ángulo de contacto medido (α_{max}) y tiempo de infiltración máximo, t_{max} ; el contenido de humedad a α_{max} o t_{max} (θ_{g-max}); el ángulo de contacto de la muestra seca ($\alpha_{105^\circ\text{C}}$) y correspondiente tiempo de infiltración, $t_{105^\circ\text{C}}$; el menor valor de θ_g al que α y t son prácticamente nulos (θ_{g-min}); la diferencia entre la repelencia máxima y la potencial, es decir, $\alpha_{err} = \alpha_{max} - \alpha_{105^\circ\text{C}}$ y $t_{err} = t_{max} - t_{105^\circ\text{C}}$; la energía libre superficial en el suelo seco, $\gamma_{s-105^\circ\text{C}}$, y a repelencia máxima, γ_{s-max} . Además se calculó el índice $IRDI = S/\theta_{g-min}$, de las siglas inglesas *Integrative Repellency Dynamic Index*, como parámetro que caracteriza la repelencia

media en el intervalo de humedad $[0, \theta_{g-\min}]$ (Regalado y Ritter, 2005). Finalmente se determinó el contenido en materia orgánica, *MO*, de todas las muestras de suelo mediante el método Walkey-Black.

2.4. Técnicas geostatísticas

Las dos herramientas de medida de la dependencia espacial más comunes en geostatística son variogramas y *kriging*. El variograma proporciona una descripción cuantitativa de cómo varía un conjunto de datos a medida que nos alejamos de puntos vecinos. Así, distancias de separación o *lag* (h) frente a estimaciones de variación, $\gamma(h)$, conforman el denominado variograma experimental, pudiendo ajustarse al mismo distintos modelos. Dos modelos frecuentemente utilizados son el esférico:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (1)$$

y el modelo exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C [1 - \exp(-3h/a)] \quad (2)$$

Las ecuaciones (1)-(2) presentan una parte estructurada, que se modela mediante dos parámetros: la *meseta* (*sill* en inglés) y el *alcance*, a (*range* en inglés). La *meseta* es el valor de varianza en el que el variograma alcanza un plateau; el *alcance* es la distancia a la que se consigue la *meseta*. En el caso del modelo exponencial (2), a se define como *alcance* efectivo, o distancia a la que $\gamma(h)$ es el 95 % de la *meseta*. C en (1)-(2) es lo que se conoce como *escala* (o *scale* en inglés) y es igual a la *meseta* menos el efecto pepita (C_0). El denominado efecto aleatorio o pepita (*nugget* en inglés) da cuenta tanto de errores de muestreo, como de microvarianza, esto es la variabilidad que tiene lugar a distancias inferiores al espaciado mínimo.

Previo al análisis geostatístico, las variables de estudio se estandarizaron tal que:

$$\tilde{Z}_i = \frac{Z_i - \bar{Z}_i}{std(Z_i)} \quad (3)$$

siendo \bar{Z}_i y $std(Z_i)$ la media y desviación estándar, respectivamente, de la variable primaria ($i=1$) o secundaria ($i=2$). Posteriormente se modelaron los variogramas directos tanto de la variable estandarizada \tilde{Z}_1 primaria como de la secundaria \tilde{Z}_2 , así como el variograma cruzado $\tilde{Z}_1 \times \tilde{Z}_2$. La calidad del ajuste se

cuantificó mediante el coeficiente de determinación, r^2 , y el error cuadrático medio (RSS). Los modelos ajustados resultantes se usaron para interpolar valores en puntos no muestreados mediante *kriging* y *cokriging*. El análisis geostatístico se realizó con el programa GS+ (versión 5.0.3 Beta, Gamma Design Software).

3.- Resultados y discusión

3.1. Variación de la repelencia con la humedad de suelo

Tanto con el test WDPT como con el MED la repelencia varió de forma no lineal con el contenido en humedad, θ_g , como se observó previamente en Regalado y Ritter (2005). En general las muestras se mostraron humectables a saturación. A partir de la humedad a capacidad de campo, tanto la persistencia como el grado de repelencia aumentaron hasta un máximo en las proximidades del punto de marchitez, para luego disminuir de forma monótonica, aunque permaneciendo repelentes después del secado a 105°C. Excepcionalmente a este comportamiento general, 9 de las 140 muestras de suelo (6%) perdieron el carácter hidrófugo tras el secado a 105°C; por el contrario un 14% de las muestras se mostraron hidrófugas, presentando un segundo máximo (global) tras llevarlas a peso seco. Este último conjunto de muestras presentó un elevado contenido medio en materia orgánica $57.1 \pm 9.7\%$, frente al mayor carácter mineral del primero ($MO= 27.1 \pm 4.3\%$). El resto de muestras, con un máximo local de repelencia a 105°C y uno global a humedades intermedias, presentaron carácter órgano-mineral ($MO=40.1 \pm 10.5\%$).

En general las curvas de repelencia obtenidas con el test WDPT presentaron peor calidad que las descritas con el MED, en términos de suavidad de trazado entre puntos medidos. Así mismo en ciertos casos se obtuvieron tiempos de infiltración elevados por encima de las 4 horas (17000 s), para los que no se continuó midiendo. Este peor comportamiento del test WDPT frente al MED se vio reflejado en la calidad de los parámetros de repelencia descritos a continuación.

3.2. Parámetros de repelencia

De todos los parámetros que describen la curva de repelencia (sección 2.3), se eligieron el área de integración, S , y el menor valor de humedad al que las muestras son humectables, $\theta_{g-\min}$, como los parámetros más relevantes. Tanto S como $\theta_{g-\min}$ contienen valiosa información sobre el carácter hidrófugo de un suelo: S es una medida del comportamiento global repelente de un suelo, y $\theta_{g-\min}$ indica a que contenidos de humedad se inicia (o finaliza, dependiendo de si se trata de un proceso de humedecimiento del suelo o de secado) la repelencia. Por otro lado S_{MED} , S_{WDPT} y $\theta_{g-\min}$ presentaron una elevada correlación. Tanto $\theta_{g-\min}$ como S se distribuyen de forma normal (resultados no mostrados). El

índice $IRDI=S/\theta_{g-min}$ presentó una mayor variación en el caso del WDPT (CV=30.6%) que en el del MED (CV=1.6%). Hay que tener en cuenta que dado que las diferencias relativas entre tiempos de infiltración medidos con el test WDPT a dos humedades de suelo distintas son mayores que las diferencias relativas en ángulo de contacto determinadas con el MED, y dado que ambos se realizan en pasos discretos de θ_g , resulta bastante probable que en general el t_{max} quede pobremente descrito con el WDPT, y por lo tanto S_{WDPT} y $IRDI_{WDPT}$ se ven afectados.

3.3. Variogramas

La Fig. 1 muestra los variogramas directos de la variable primaria (\tilde{S}_{WDPT}) como de la secundaria Z_2 estandarizadas. Como variable secundaria se eligieron \tilde{S}_{MED} y el parámetro $\tilde{\theta}_{g-min}$ determinado con los dos métodos (WDPT y MED). Hay que tener en cuenta que la determinación de θ_{g-min} es muy sencilla (se precisa determinar la repelencia sólo en los primeros estadios de secado y para tiempos de infiltración cortos <5 min), al contrario de lo que ocurre con S , que exige realizar los tests desde saturación hasta peso seco.

Tabla 1. Parámetros e índices de bondad de ajuste de los modelos ajustados a los distintos variogramas experimentales directos y cruzados mostrados en la Fig. 1.

Variograma	Modelo	C_0	C	a (m)	r^2	RSS
\tilde{S}_{WDPT}	Exp.	0.297	1.023	15	0.719	0.957
\tilde{S}_{MED}	Exp.	0.345	0.747	171	0.858	0.225
$\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{S}_{MED}$	Esf.	0.213	0.581	9	0.934	0.0512
$\tilde{\theta}_{g-min-WDPT}$	Exp.	0.311	0.740	117	0.811	0.334
$\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{\theta}_{g-min-WDPT}$	Exp.	0.263	0.442	72	0.915	0.0428
$\tilde{\theta}_{g-min-MED}$	Exp.	0.361	0.734	195	0.823	0.273
$\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{\theta}_{g-min-MED}$	Esf.	0.208	0.555	8	0.939	0.0415

El semi-variograma de \tilde{S}_{WDPT} mostró un cambio brusco en variabilidad entre el salto de pequeña a meso escala, con un alcance efectivo corto, $a=15$ m (Fig 1a). El alcance efectivo de las variables secundarias es por el contrario muy superior, entre 100 y 200 m: $a(\tilde{S}_{MED}) = 171$ m, $a(\tilde{\theta}_{g-min-WDPT}) = 117$ m y $a(\tilde{\theta}_{g-min-MED}) = 195$ m. Los valores obtenidos indican una dependencia espacial de largo *alcance*, si se comparan con el de otras propiedades del suelo (ver Tabla 9.2 en Mulla y McBratney, 2002). Esto tiene además consecuencias prácticas a la hora de diseñar un muestreo. Flatman y Yfantis (1984) sugieren un valor de 1/4 a 1/2 del *alcance* como valor óptimo de distancia de separación para muestrear. En todos los casos, el variograma directo es de tipo exponencial, aunque la bondad del ajuste es mayor para las variables secundarias

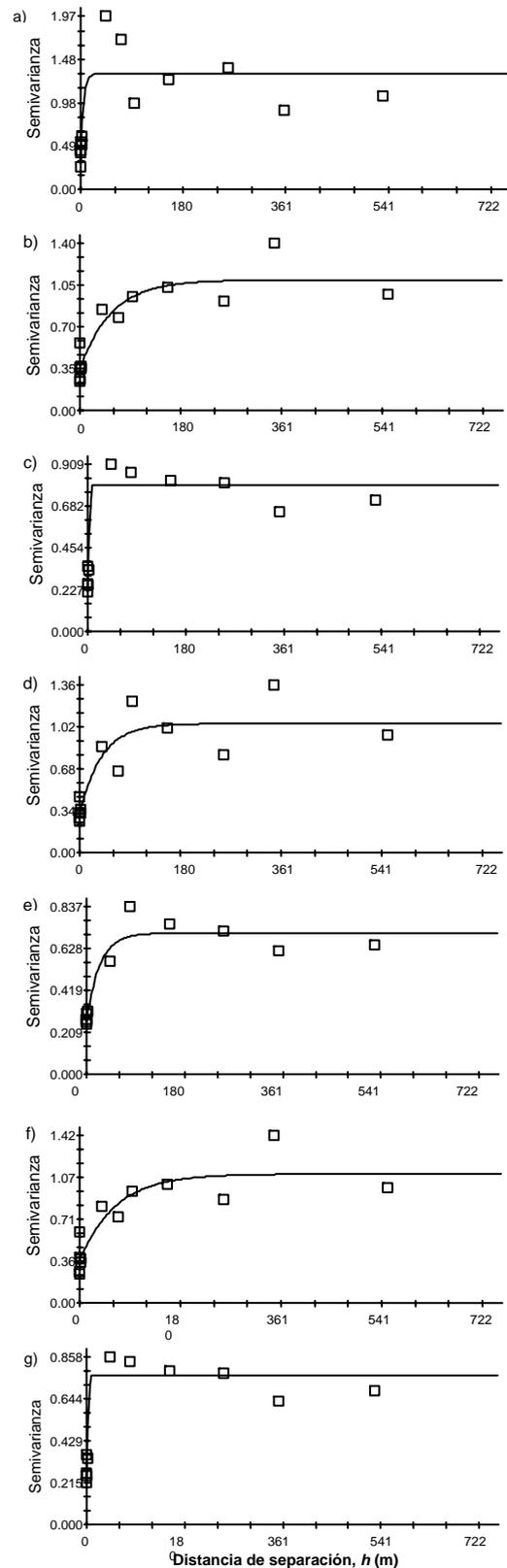


Fig. 1: Variogramas directos y cruzados de las variables primarias y secundarias: a) \tilde{S}_{WDPT} b) \tilde{S}_{MED} c) $\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{S}_{MED}$ d) $\tilde{\theta}_{g-min-WDPT}$ e) $\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{\theta}_{g-min-WDPT}$ f) $\tilde{\theta}_{g-min-MED}$ g) $\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{\theta}_{g-min-MED}$.

($r^2 > 0.8$; $RSS < 0.3$) que para la primaria ($r^2 = 0.72$; $RSS = 0.96$). Consecuentemente los variogramas cruzados mejoran la bondad de ajuste del variograma de \tilde{S}_{WDPT} ($r^2 > 0.9$; $RSS < 0.05$). El variograma cruzado $\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{\theta}_{g-min-WDPT}$ es de tipo exponencial con un alcance efectivo $a = 72$ m, mientras que para $\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{S}_{MED}$ ($a = 9$ m) y $\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{\theta}_{g-min-MED}$ ($a = 8$ m) el modelo esférico (1 se ajustó mejor. El efecto pepita (aleatorio) es similar $C_0 = [0.208, 0.361]$ para todos los variogramas (Tabla 1).

3.4. Kriging y cokriging

Teniendo en cuenta la información contenida en los variogramas ajustados en la sección anterior, se generaron mapas de distribución de \tilde{S}_{WDPT} dentro de la cuenca de estudio mediante interpolación con *kriging*. Así mismo se estudió el efecto de mejora que el uso de una variable secundaria supuso en la interpolación espacial, mediante *cokriging* (Fig. 2). Los mapas generados por *cokriging* fueron similares en todos los casos por lo que sólo se muestra un ejemplo en el que como variable secundaria se utilizó \tilde{S}_{MED} . Comparando la Fig. 2a y 2b se observa la mejora en la representación espacial de la variable \tilde{S}_{WDPT} que supone el *cokriging* frente al *kriging*.

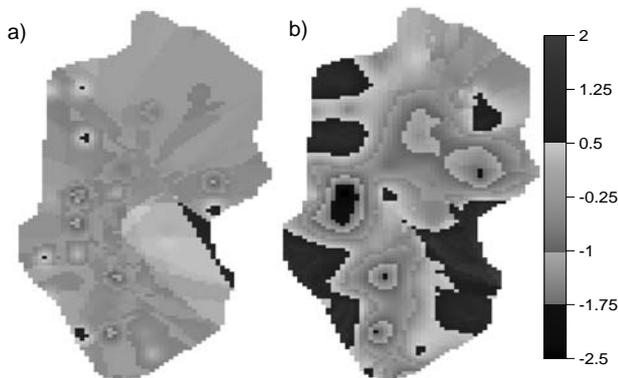


Fig. 2: Mapas de (a) *kriging* de \tilde{S}_{WDPT} y (b) *cokriging* para $\tilde{S}_{WDPT} \times \tilde{S}_{MED}$.

4.- Conclusiones

Mediante técnicas geostatísticas se puso en evidencia y cuantificó la estructura espacial de parámetros de repelencia en una cuenca hidrológica en el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera) obtenidos mediante dos métodos metodológicamente distintos que caracterizan la persistencia (WDPT) y el grado de repelencia o ángulo de contacto (MED). Las técnicas de *cokriging* se proponen como una herramienta útil para diseñar estrategias de muestreo espacial en las que un parámetro relevante desde el punto hidrológico en la

Zona No saturada, tal como el área debajo de la curva de repelencia obtenida mediante el test WDPT, S_{WDPT} , pueda hacerse extensible a zonas no muestreadas a partir de parámetros correlacionados con S_{WDPT} , tales como S_{MED} y θ_{g-min} de más fácil obtención.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado con fondos del INIA- Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias (Proyecto RTA2005-228). Los autores agradecen a A. Pérez Buenafuente su colaboración en las medidas de laboratorio y muestreo en campo. Igualmente agradecen el apoyo prestado por el personal del Parque Nacional de Garajonay y especialmente a L.A. Gómez y el director A. Fernández.

Bibliografía

- Berglund, K. y L. Perrson. 1996. Water repellence of cultivated organic soils. Acta Agric. Scand. 46: 145-152.
- Brock, J.H. y L.F. DeBano. 1990. Wettability of an Arizona chaparral soil influenced by prescribed burning. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RM-191: 206-209.
- de Jonge, L.W., O.H. Jacobsen y P. Moldrup. 1999. Soil water repellency: Effects of water content, temperature y particle size. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 437-442.
- DiCarlo, D.A., T.W.J. Bauters, C.J.G. Darnault, T.S. Steenhuis y J.-Y. Parlange. 1999. Rapid determination of constitutive relations with fingered flow. pags. 433-440. En: M.Th. van Genuchten, F.J. Leij y L. Wu (eds). Proceedings of the International Workshop, Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. University of California, Riverside.
- Doerr, S.H. y A.D. Thomas. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: New evidence from forest soils in Portugal. J. Hydrol. 231-232: 134-147.
- Doerr, S.H., L.W. Dekker, C.J. Ritsema, R.A. Shakesby y R. Bryant. 2002. Water repellency of soils: The influence of ambient relative humidity. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 401-405.
- Douglas, P., K. A. Mainwaring, C. P. Morley y S. H. Doerr. 2005. If Water Drop Penetration Time tells us about the kinetics of soil water repellency, and Molarity of Ethanol Drop studies about the energetics, what is the relationship between the two measurements? Geophysical Research Abstracts 7: 10903.
- Flatman, G.T. y A.A. Yfantis. 1984. Geostatistical strategies for soil sampling: The survey and the census. Environ. Monit. Assess. 4: 335-349.
- Goebel, M.-O., J. Bachmann, S.K. Woche, W.R. Fischer y R. Horton. 2004. Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 383-393.
- Hallett, P.D., N. Nunan, J.T. Douglas y I.M. Young. 2004. Millimeter-scale spatial variability in soil water sorptivity: scale, surface elevation y subcritical repellency effects. Soil Sci. Soc. Am. J. 68: 352-358.
- Jamison, V.C. 1945. The penetration of irrigation and rain water into sandy soils of Central Florida. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 10: 25-29.
- Jaramillo J., D.F. 2004. Repelencia al agua en suelos: Con énfasis en Andisoles de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Jex, G.W., B.H. Bleakley, D.H. Hubbell y L.L. Munro. 1985. High humidity-induced increase in water repellency in some sandy soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 1177-1182.
- King, P.M. 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. Aust. J. Soil Res. 19: 275-285.
- Letey, J., M.L.K. Carrillo y X.P. Pang. 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. J. Hydrol. 231-232: 61-65.
- Ma'shum, M. y V.C. Farmer. 1985. Origin and assessment of water repellency of a sandy soil. Aust. J. Soil Res. 23: 623-626.
- Moral, F.J. 1999. Hidrología de los suelos arenosos del Parque Natural del Entorno de Doñana. PhD Thesis, Universidad de Córdoba, Córdoba.
- Mulla, D.J. y A.B. McBratney. 2002. Soil spatial variability. pp. 343-373. En: A.W. Warrick. Soil physics companion (ed.). CRC Press LLC, Florida.
- Nielsen, D.R. y O. Wendroth. 2003. Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation. Catena Verlag, Reiskirchen.

- Regalado, C.M. y A. Ritter. 2005. Characterizing water dependent soil repellency with minimal parameter requirement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1955-1966.
- Regalado, C.M. y A. Ritter. 2006. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of soil water repellency parameters in a laurel forest watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1071-1081.
- Roberts, F.J. y B.A. Carbon. 1971. Water repellence in sandy soils of South-Western Australia. II. Some chemical characteristics of the hydrophobic skins. *Aust. J. Soil Res.* 10: 35-42.
- Roy, J.L. y W.B. McGill. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Sci.* 167: 83-97.
- Scott, D.F. y D.B. van Wyk, 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *J. Hydrol.* 121: 239-256.
- Shakesby, R.A., C. Coelho, A. de O, A.D. Ferreira, J.P. Ferry y R.P.D. Walsh. 1994. Fire, post-burn land management practices and soil erosion response curves in eucalyptus and pine forests, North-Central Portugal. pags. 15-27. En: M. Sala y J.L. Rubio (eds). *Soil erosion as a consequence of forest fires*. Geoforma Ediciones, Logroño.
- van Dam, J.C., J.H.M. Wönsten, y A. Nemes. 1996. Unsaturated soil water movement in hysteretic and water repellent field soils. *J. Hydrol.* 184: 153-173.
- Wallis, M.G. y D.J. Horne. 1992. Soil water repellency. *Adv. Soil Sci.* 20: 91-146.
- Wallis, M.G., D.J. Horne y K.W. McAuliffe. 1990. A study of water repellency and its amelioration in a yellow brown sand. 1. Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion. *N.Z.J. Agr. Res.* 3: 139-144.
- Wallis, M.G., D.R. Scotter y D.J. Horne. 1991. An evaluation of the intrinsic sorptivity water repellency index on a range of New Zealand soils. *Australian Journal of Soil Research* 29: 353-362.