

## CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA NO SATURADA DE UN BOSQUE MADURO DE LAURISILVA EN EL PARQUE NACIONAL DE GARAJONAY: HIDROFOBICIDAD E IMPLICACIONES HIDROLÓGICAS

C. M. Regalado<sup>1</sup>, G. García-Santos<sup>1</sup>, J. M. Hernández Moreno<sup>2</sup>, A. Pérez Buenafuente<sup>1</sup> y A. R. Socorro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Canario Investigaciones Agrarias, Dpto. Suelos y Riegos, Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife, España. cregalad@icia.es; ggarcia@icia.es.

<sup>2</sup>Universidad La Laguna, Dpto. Edafología y Geología, Av. F. Sánchez, S/n, 38204 La Laguna Tenerife, España. jhmoreno@ull.es

**RESUMEN.** La hidrofobicidad de los suelos puede afectar a las propiedades hidrológicas de la zona no saturada, reduciendo la capacidad de infiltración y aumentando la escorrentía y las pérdidas de humedad debido a procesos de evaporación. El presente estudio determina la persistencia y el grado de hidrofobicidad de suelos volcánicos altamente orgánicos procedentes de una cuenca hidrológica situada en el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera). La metodología seguida hace uso del método del tiempo de infiltración de la gota de agua (WDPT) y del método de la molaridad de la gota de etanol (MED), aplicados a muestras de suelo a diferentes contenidos de humedad ( $\theta$  g/g). Se obtienen así la variación del tiempo de persistencia a la hidrofobicidad ( $t_i$ ) y el ángulo de repelencia ( $\alpha_{1-s}$ ) en función de  $\theta$ . Se observa un comportamiento hidrófobo no monotónico en el que la repelencia al agua aumenta inicialmente hasta un valor máximo y decrece posteriormente a medida que  $\theta$  disminuye. Se proponen dos modelos empíricos a los que se ajustan el conjunto de datos  $t_i$ - $\theta$  y  $\alpha_{1-s}$ - $\theta$ , permitiendo así cuantificar dicho comportamiento mediante parámetros de forma. Medidas de la capacidad de retención de humedad demuestran que los suelos son hidrófobos en el intervalo de agua útil para las plantas. Se estudian igualmente posibles correlaciones entre parámetros de forma que describen distintos aspectos de la hidrofobicidad de estos suelos y el contenido en materia orgánica. La importancia de la hidrofobicidad se evalúa en términos de riesgo de erosión potencial de los suelos de la cuenca.

**ABSTRACT.** Characterization of the vadose zone of a laurisilva mature mountain forest in the Garajonay National Park: Hydrophobicity and hydrological consequences. Soil water repellency may affect hydrological properties in the unsaturated zone, diminishing infiltration capacity and increasing runoff and water loss due to evaporation. The current study determines the persistency and the degree of hydrophobicity in highly organic volcanic soils from a forest watershed located in the Garajonay National Park. Both, the water droplet penetration time (WDPT) and the molarity of ethanol droplet (MED) tests have been applied at different soil water contents ( $\theta$  g/g). Thus, differences in

time infiltration ( $t_i$ ) and contact angle ( $\alpha_{1-s}$ ) are obtained. A non-monotonic hydrophobic behaviour is observed, whereby hydrophobicity initially increases up to a maximum and then decreases as  $\theta$  diminishes. Two empirical models are proposed that fit the  $t_i$ - $\theta$  and  $\alpha_{1-s}$ - $\theta$  data sets, thus allowing us to quantify such a hydrophobic behaviour by fitted shape parameters. Moisture characteristic measurements indicate that soils are repellent within the range of water content available to plants. Possible correlations between water repellency shape parameters and organic matter content are investigated. Finally, potential risk erosion of the watershed soils is evaluated.

---

### 1. Introducción

La hidrofobicidad o repelencia al agua de los suelos es un fenómeno que se caracteriza por la pérdida de afinidad al agua de un suelo, el cual se resiste a ser mojado de manera temporal (citado por Doerr et al., 2000).

Algunos factores que potencialmente pueden inducir la repelencia al agua en los suelos son la materia orgánica y las variaciones del contenido de humedad de los suelos. La materia orgánica puede inducir repelencia al agua en los suelos debido a un proceso de desecación (Díaz-Fierros, 1977; Wallis y Horne, 1992), por la presencia de sustancias orgánicas procedentes de residuos vegetales (DeBano, 1981; Moral et al., 2002) y/o de subproductos procedentes de la actividad metabólica de los microorganismos que en ambos casos recubren a las partículas del suelo (Bond, 1969; Chang, 1992). La vegetación de la zona de estudio, denominada laurisilva canaria, es capaz de depositar grandes cantidades de hojarasca sobre el suelo, bajo la cual puede desarrollarse una gran actividad microbiológica. Esta vegetación también es responsable del alto contenido en materia orgánica a nivel superficial.

Las variaciones en el contenido de humedad del suelo pueden afectar al carácter hidrófobo (Wallis et al., 1990; Dekker, 1998; Dekker et al., 2000; De Jonge et al., 1999) y

están relacionadas con las condiciones climáticas. Los efectos que un mismo contenido de humedad puede producir en distintos suelos dependerán de las propias características del suelo y de los antecedentes climáticos. Algunos suelos después de un periodo de desecación pueden transformarse en hidrófobos y restaurar sus propiedades iniciales no repelentes al agua tras varios periodos de lluvias (Dekker y Ritsema, 1994). Por el contrario, la hidrofobicidad puede aparecer a partir de condiciones climáticas muy húmedas (Jaramillo, 2000).

La importancia de detectar posibles horizontes hidrófobos en un suelo radica en que éstos pueden afectar a las propiedades hidráulicas de la zona no saturada modificando la curva característica del suelo (DiCarlo et al., 1999; Bauters et al., 2000). Con lo que se favorece la aparición de vías preferenciales para el movimiento de agua y solutos y se generan frentes de humedecimiento irregulares (Wallis y Horne, 1992). La conductividad, hidráulica saturada e insaturada puede ser modificada (van Dam et al., 1996), reduciéndose así la capacidad de infiltración y aumentando la escorrentía y las pérdidas de humedad debido a procesos de evaporación (Scott y Van Wyk, 1990), aumentando la erosión de los suelos afectados (Shakesby et al., 1994).

Los objetivos de este estudio son: i) estudiar la relación existente entre el contenido de materia orgánica y el carácter hidrófobo de los suelos estudiados; ii) determinar la evolución de la hidrofobicidad a medida que se desecan los suelos y establecer los contenidos hídricos críticos que podrían ser indicativos de un comportamiento similar en condiciones de campo bajo distintos regímenes climáticos; iii) evaluar los posibles riesgos de erosión en la cuenca experimental estudiada debido a la presencia de horizontes hidrófobos.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Descripción de la cuenca experimental

El estudio se lleva a cabo en una cuenca experimental de 43.7 ha situada en un bosque maduro subtropical de montaña húmedo, en el Parque Nacional de Garajonay, isla de La Gomera (España). Los suelos son de origen volcánico con carácter ándico, la orografía es muy accidentada (pendientes entre 10-30%) y la altitud de la cuenca está comprendida entre 1090 m y 1270 m s.n.m.. El nivel medio de humedad relativa durante el año es alto (80%), las temperaturas son suaves (13,6 °C de media anual) con pequeñas oscilaciones y la pluviometría media anual es de 750 mm. La vegetación de la cuenca (laurisilva canaria) está fundamentalmente compuesta por especies lauráceas y puede ser clasificada en tres grupos (Pérez de Paz, 1990): “Fayal-brezal arbóreo” localizado en la crestería; “vegetación de transición” situada en las laderas y “laurisilva de valle con viñátigo” situada en los fondos de valle.

### 2.2. Diseños de muestreo

Se llevaron a cabo tres tipos de muestreo. La caracterización de propiedades físico-químicas se realizó sobre muestras ( $n=33$ ) obtenidas al azar en cuatro profundidades (0-0.03; 0.03-0.23; 0.23-0.43; 0.43-0.63 m). Un segundo muestreo sistemático consistió en una malla de 56 puntos situados en las intersecciones de celdas rectangulares (100 m x 75 m). En cuatro puntos de esta malla se realizó un muestreo geoestadístico compuesto por 21 puntos, separados entre sí como máximo 0.25 m. Todas las muestras de este segundo muestreo ( $n=56+4 \times 21=140$ ) fueron recogidas a una profundidad entre 0-0.03 m después de retirar la capa de hojarasca, que puede llegar a tener hasta 0.04 m de espesor.

### 2.3. Propiedades físico-químicas del suelo

La textura se determinó con el método del densímetro de Bouyoucos (M.A.P.A., 1994). La densidad aparente y la porosidad se obtuvieron por gravimetría (Klute, 1986). También se han estudiado algunos de los parámetros que caracterizan a los suelos con carácter ándico. Con este fin se determinaron el pH en fluoruro de sodio (NaF) (Blakemore et al., 1987), en agua y en cloruro potásico (ClK) en muestras secadas al aire (tamizadas a 2 mm de luz), el contenido en carbono orgánico (M.A.P.A., 1994) y en lípidos mediante la extracción en Diclorometano/metanol (9:1 v/v), los contenidos de aluminio, hierro y sílice extraídos con oxalato amónico ( $Al_o$ ,  $Fe_o$ ,  $Si_o$ ) y con pirofosfato sódico ( $Al_p$ ,  $Fe_p$ ,  $Si_p$ ) (Blakemore et al., 1987).

### 2.4. Determinación de la hidrofobicidad: WDPT y MED

Las muestras fueron tamizadas (2 mm de luz) manualmente a la humedad de campo, puesto que el secado de los suelos volcánicos modifica las propiedades físicas, químicas e hidráulicas (Maeda y Soma, 1992; Jaramillo, 1999). Un volumen aproximado de 230 cc de suelo se depositó en placas Petri y se humedeció hasta saturación. La hidrofobicidad se determinó durante el secado al aire de los suelos, desde saturación y aplicando los métodos de la gota de agua y la moralidad de etanol en decrementos de 3 gr de peso de suelo.

El método de la gota de agua (“Water Droplet Penetration Time” o WDPT) (Letey, 1969) estima la persistencia de la hidrofobicidad a partir del tiempo que necesita una gota de agua para infiltrar en un suelo ( $t_i$ ). Si  $t_i < 5s$  el suelo no es hidrófobo. Los resultados obtenidos en este trabajo representan el tiempo medio de infiltración de tres gotas de agua depositadas sobre la misma muestra de suelo. Por otro lado el método MED (“Molarity of Ethanol Droplet” o MED) estima la severidad de la hidrofobicidad y se puede calcular el ángulo de contacto entre el sólido y el líquido ( $\alpha_{l-s}$ ) (Carrillo et al., 1999; Roy y McGill, 2002). Si  $\alpha_{l-s} \approx 90^\circ$  ( $\cos \alpha_{l-s} = 0$ ) el suelo será no hidrófobo y si es  $> 90^\circ$  tendrá poca afinidad al agua (hidrófobo).

Tras el secado al aire, las muestras se secaron en estufa a 55°C, 60°C y 105°C y finalmente, la humedad gravimétrica ( $\theta$  g/g) asociada a cada método se calculó conocido el peso seco de cada muestra (secada en estufa a 105°C hasta peso constante).

## 2.5. Capacidad de retención de agua de los suelos

El agua útil se determinó a partir de los contenidos de humedad gravimétrica a 1/3 ( $\theta_{CC}$ ) y 15 bar ( $\theta_{PM}$ ) mediante placas de Richards utilizando muestras alteradas (tamizadas en húmedo a 2 mm) previamente saturadas con una solución de  $\text{CaSO}_4$  0.005M y timol para así minimizar la dispersión de arcillas y la degradación de materia orgánica (Klute, 1986). Se depositaron pesos individuales de 700 g sobre cada muestra (Klute, 1986) para asegurar el contacto con la placa cerámica, ya que se observaron cambios importantes en el volumen de las muestras al disminuir el contenido de humedad.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Características físico-químicas de los suelos

Los suelos de la cuenca presentan una textura (U.S.D.A) franco-arenosa (18.1% arcilla, 22.6% limo, 59.3% arena) y una capacidad de retención de agua muy alta a 1/3 y 15 bar ( $\theta_{CC}=118\pm 26.4$  g/g;  $\theta_{PM}=49\pm 12$  g/g) que deja disponible altos contenidos de humedad para las plantas (agua útil=69 g/g). La densidad aparente ( $0.6$  g/cm<sup>3</sup>  $\pm 0.1$ ) es baja, el contenido de materia orgánica ( $41.9\pm 12.5\%$ ) es elevado y el pH ( $5.5 \pm 0.4$ ) es fuertemente ácido (clasificación U.S.D.A 1967). El contenido de materia orgánica (M.O) y lípidos desciende en profundidad (Tabla 1).

Los resultados de WDPT y MED en las muestras (secadas al aire) procedentes de distintas profundidades (1<sup>er</sup> muestreo, n=33) (Tabla 1) indican que el horizonte hidrófobo está situado en los primeros 0.23 m de profundidad. Los estratos >0.23 m son completamente humectables (Tabla 1). Al comparar los dos horizontes hidrófobos se observa que el primero (H1) es mucho más repelente que el segundo (H2), debido probablemente al mayor contenido medio de M.O.

**Tabla 1.** Variación de las propiedades químicas y de la hidrofobicidad en función de la profundidad de los estratos (valores medios).

Prof.(m)	M.O(%)	WDPT(s)	MED( $\alpha_{w-s}$ )	Lípidos*	pH <sub>NaF</sub>
H1:0-0.03	41.9±12.5	944±1197	96.9±5.2	21.2±16.2	9.2±1.2
H2:0.03-0.23	12.0±0.5	86±219	90.9±1.8	2.3	10.9±0.5
H3:0.23-0.43	10.1±0.5	0	90	-	11.1±0.5
H4:0.43-0.63	6.9±0.6	0	90	0.6	11.1±0.6

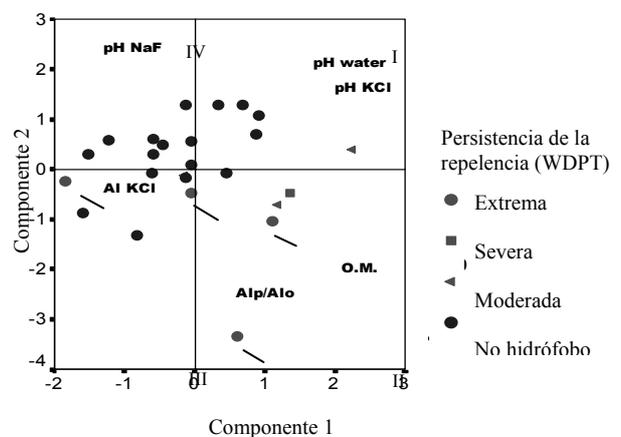
\* mg lípidos/g suelo

En las muestras de H1 y H2 obtenidas de los tres muestreos (n=33+140=173) se relacionó la M.O y la hidrofobicidad (WDPT y MED), observándose que aquellos suelos que eran no repelentes al agua tenían valores de M.O  $\leq 8\%$ . Los suelos repelentes al agua (M.O >8%) no presentaron una tendencia definida al relacionar la

hidrofobicidad, la cantidad de M.O y el contenido en lípidos, posiblemente debido al diferente grado de descomposición de la M.O (Valat et al., 1991; Jaramillo, 1999; Michel et al., 2001) (no analizado en este estudio).

Se estudió la distribución de los suelos en la cuenca en función del contenido medio de M.O en H1 (n=60) y a su vez éste fue relacionado con los distintos grupos de vegetación de laurisilva (descritos en el apartado 2.1). Los suelos con contenidos de M.O alto (>30%) y medio ( $20\% < \text{M.O} \leq 30\%$ ) representan el 98% de los suelos muestreados. No se obtuvo ninguna relación entre éstos y el tipo de vegetación. Se observó que algunas de las muestras (5%) con bajo contenido en M.O ( $5\% < \text{M.O} \leq 20\%$ ) estaban situadas en las zonas de crestería donde se localiza el Fayal-Brezal.

Un análisis de componentes principales (ACP) realizado entre algunos de los parámetros que caracterizan el carácter ándico de los suelos (ver 2.3) y la afinidad al agua de estos suelos medida con el método WDPT, permite identificar correlaciones entre ellos. La figura 1 corresponde a la gráfica de saturación (plano principal) del ACP, las variables son  $\text{Al}_{\text{KCl}}$ ,  $\text{Al}_p/\text{Al}_o$ ,  $\text{pH}_{\text{NaF}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ,  $\text{pH}_{\text{agua}}$  y %M.O y está constituida por las dos primeras componentes que explican el 76% de la variabilidad. La componente 1 representa principalmente el carácter alofánico y la componente 2 el carácter orgánico. En la gráfica las muestras no hidrófobas están representadas por círculos llenos y el resto de símbolos corresponde a la clasificación de WDPT según la escala propuesta por Letey (1969). De este ACP se observa que en el cuarto cuadrante los valores altos de  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  ( $\approx 11$ ) (carácter alofánico) están relacionados positivamente con los suelos no hidrófobos. En el segundo cuadrante las muestras con mayores  $\text{Al}_p/\text{Al}_o$  (carácter organomineral o no alofánico), %M.O y carácter hidrófobo están correlacionadas positivamente. Finalmente podríamos concluir que los suelos no alofánicos (contenido alto en  $\text{Al}_p/\text{Al}_o$ ) ricos en humus están relacionados con los suelos repelentes al agua y los suelos alofánicos (contenido alto en  $\text{Al}_{\text{KCl}}$  y  $\text{pH}_{\text{NaF}}$ ) con los no repelentes al agua.



**Fig. 1.** ACP. Relación entre algunos parámetros característicos de los suelos ándicos y la hidrofobicidad (WDPT).

### 3.2. Efecto del secado al aire y en estufa en los métodos WDPT y MED

Para cada suelo (n=140) se han determinado el tiempo de infiltración (WDPT) y el ángulo de contacto (MED) durante el proceso de desorción al aire y después del secado en estufa (ver 2.4). En la figura 2 se muestran los resultados de cuatro suelos tipo (A,B,C y D), clasificados de esta manera porque representan evoluciones distintas tras el secado en estufa. La evolución de la hidrofobicidad en función de  $\theta$  está dividida en tres fases (I, II, III), la I y II corresponden al secado al aire y es la misma para todas las muestras (n=140). La fase III corresponde al secado en estufa. A continuación se describen las tres fases:

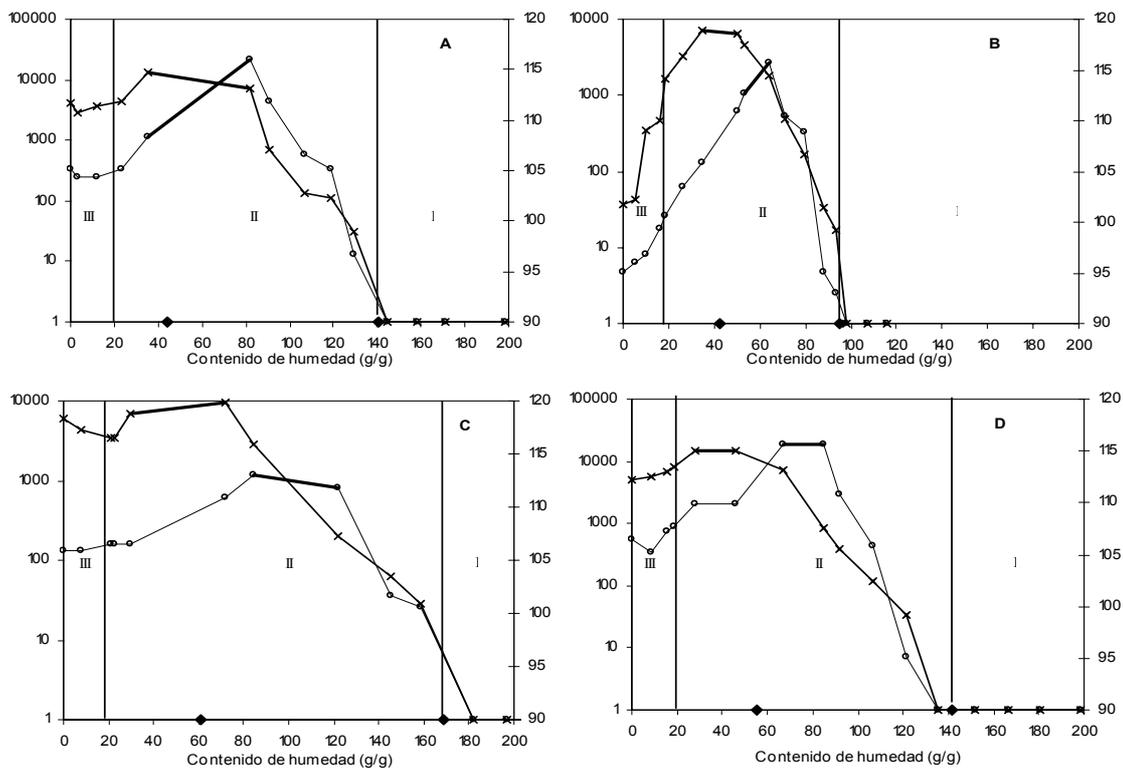
Fase I: Esta fase comprende desde el estado de saturación del suelo hasta su  $\theta_{CC}$ , en el cual los suelos resultan ser no repelentes al agua debido al efecto de las fuerzas de adhesión entre el líquido y el suelo.

Fase II: Esta fase está comprendida entre la  $\theta_{CC}$  y la humedad de los suelos cuando están secos al aire ( $\theta_s \approx 20 g/g). Se observa que  $t_i$  y  $\alpha_{i-s}$  aumentan desde  $\theta_{CC}$  de forma prácticamente exponencial hasta aproximadamente  $\theta_{PM}$ , a$

partir de este punto la hidrofobicidad disminuye con el secado, sin embargo cuando los suelos alcanzan  $\theta_s$  no se transforman en hidrófilos. De Jonge et al. (1999) obtuvo la misma evolución no monotónica de la hidrofobicidad aplicando el método MED pero para un intervalo de humedad 0-0.12 g/g.

Estas variaciones en el grado y la persistencia de la hidrofobicidad en el proceso de desorción podrían ser debidos a posibles cambios en la orientación de los compuestos orgánicos anfílicos al exponer sus radicales hidrófobos (aumento de la hidrofobicidad) o hidrófilos (aumenta la afinidad de los suelos al agua) (Wallis et al., 1990). Díaz-Fierros (1977) explica el aumento de la hidrofobicidad en suelos orgánicos que han sido secados, debido a la aproximación de los puentes que enlazan las partículas elementales de los suelos y a la reducción del volumen de las partículas elementales de origen orgánico.

Podríamos concluir que el carácter hidrófobo (WDPT y MED) en el primer horizonte (H1) es fuertemente dependiente del contenido de  $\theta$  y se manifiesta en el intervalo de humedad que está disponible para las plantas.



**Fig. 2.** Resultados experimentales tras aplicar WDPT ( $t_i$ ) (símbolos “x”) y MED ( $\alpha_{i-s}$ ) (símbolos “o”) en cuatro suelos tipo A, B, C y D en función del contenido de humedad de los suelos ( $\theta$  g/g). Se distinguen tres fases: Fase I: saturación; Fase II: comprendida entre la capacidad de campo ( $\theta_{cc}$ ) y el contenido de humedad de los suelos secos al aire ( $\approx 20$  g/g); Fase III: suelos secados en estufa a 55°, 60° y 105 °C.

Para tiempos de infiltración bajos (WDPT) ambos métodos pueden ser comparables (Fig.2).

La fase III corresponde al secado de los suelos en estufa. En los suelos tipo A el efecto del secado provoca

el aumento de WDPT y MED. Este comportamiento es seguido por la mayoría de las muestras (56%) al igual que en los estudios realizados por Franco et al. (1995), Dekker y Ritsema (1996) y Jaramillo (2003). En los suelos tipo B (11%) se produce el efecto contrario,

WDPT y MED disminuyen, también observado por Dekker (1998). El 33% de los suelos restantes se comporta de manera desigual en función del método utilizado para determinar la hidrofobicidad. Dentro de este grupo los suelos tipo C (10%) se caracterizan por el aumento de WDPT y la disminución de MED. Tan solo en un 3% de los suelos (suelos tipo D), al aumentar WDPT disminuye MED. De manera excepcional dos de los suelos recuperaron totalmente la afinidad al agua tras ser secados en estufa.

Estos comportamientos no pueden ser explicados debido al diferente contenido medio de M.O presente en cada grupo de suelos. Las muestras en A tienen un  $41 \pm 13\%$  de M.O, en B un  $34 \pm 9\%$ , en C  $45 \pm 11\%$  y en D  $45 \pm 14\%$ . Si parte de la materia orgánica se volatiliza cuando es secada a  $105^\circ\text{C}$ , podemos concluir que deben existir otros componentes capaces de producir estas variaciones en la hidrofobicidad.

### 3.3. Modelos empíricos WDPT- $\theta$ y MED- $\theta$ (fases I y II)

Tras obtener los resultados de WDPT y MED, se han ajustado dos funciones (1 y 2) que representan el comportamiento teórico de la hidrofobicidad en función de la  $\theta$ . La motivación de los ajustes surge en obtener un modelo sencillo capaz de representar de forma objetiva las fases I y II de WDPT y MED. Para ello la siguiente función se ha ajustado a los resultados experimentales ( $n=114$ ) de WDPT

$$\ln t_i = (a + c\theta) / (1 + b\theta + d\theta^2) \quad (1)$$

con un coeficiente de determinación ( $r^2=0.89$ ). Esta función no permitió ajustes aceptables en 26 suelos, sin embargo en 12 de éstos se pudo usar (2). Para el método MED, la función

$$M = (a + c\theta) / (1 + b\theta + d\theta^2) \quad (2)$$

se ajustó ( $r^2=0.90$ ) a los resultados experimentales ( $n=123$ ), en donde M es la molaridad de etanol utilizada en el método MED. Estos resultados (M) han sido transformados en ángulo de contacto (ver procedimiento en Roy y McGill, 2002). Las curvas tipo WDPT y MED que resultan de (1) (2) se muestran en las figuras 3 y 4.

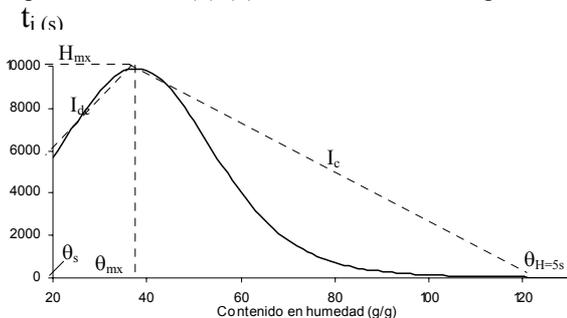


Fig. 3. Curva tipo resultante de aplicar el modelo WDPT- $\theta$  y parámetros de forma  $H_{mx}$ ,  $\theta_{mx}$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{H=5s}$ ,  $\theta_{H=0}$ ,  $I_c$  y  $I_{dc}$  definidos en Tabla 2.

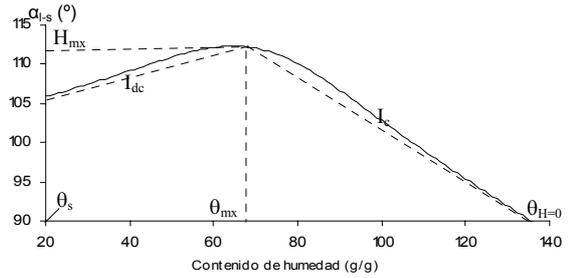


Fig. 4. Curva tipo resultante de aplicar el modelo MED- $\theta$  y parámetros de forma  $H_{mx}$ ,  $\theta_{mx}$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_{H=5s}$ ,  $\theta_{H=0}$ ,  $I_c$  y  $I_{dc}$  definidos en Tabla 2.

### 3.4. Variabilidad de los métodos WDPT y MED

A partir de los modelos WDPT- $\theta$  y MED- $\theta$  se han obtenido los valores medios de  $t_i$  ( $n=114$ ) y  $\alpha_{L-s}$  ( $n=123$ ) correspondientes a las siguientes humedades 20, 40, 60, 80, 120 y 140 g/g. Los resultados muestran que la variabilidad del método WDPT aumenta a mayores tiempos de infiltración, también observado por King (1981) y Jaramillo (2001). Y por otro lado se obtiene que la variabilidad del método MED aumenta con el contenido de humedad del suelo. Desde un punto de vista metodológico, el uso de MED es más conveniente en suelos secos al aire y extremadamente hidrófobos.

### 3.5. Análisis de la geometría de las curvas tipo

Se ha estudiado la forma de las curvas tipo obtenidas a partir de los modelos (ecuaciones 1 y 2) mediante los parámetros  $\theta_{h0-hs}$ ,  $H_{mx}$ ,  $I_c$  y  $I_{dc}$  (Tabla 2, Fig. 3 y 4), con lo que se pueden evaluar por un lado la rapidez ( $I_c$ ) con la que los suelos alcanzan su máxima hidrofobicidad ( $H_{mx}$ ) y por otro la rapidez con la que recuperan un estado menos repelente ( $I_{dc}$ ). El parámetro  $\theta_{h0-hs}$  determina la dispersión de las curvas, cuanto mayor es  $\theta_{h0-hs}$  antes empieza el suelo a mostrar repelencia al agua. Se observa que en WDPT el  $H_{mx}$  se alcanza paulatinamente y la recuperación se lleva a cabo rápidamente ( $I_c < I_{dc}$ ). Por el contrario, en MED se alcanza más rápidamente  $H_{mx}$  y se recupera poco y lentamente.

Tabla 2. Parámetros de forma que describen las curvas de hidrofobicidad.

Parámetros	Descripción
$\theta_{h0-hs}$	Intervalo medio de humedad (g/g). $\theta_{h0-hs} = \theta_{H=0} \text{ o } \theta_{5s} - \theta_s$
$I_c$	Índice de crecimiento medio. $I_c = H_{mx} / (\theta_{H=0,5} - \theta_{mx})$
$\theta_s$	Humedad de los suelos secos al aire 20 g/g
$\theta_{mx}$	Humedad cuando la hidrofobicidad es máxima
$H_{mx}$	Hidrofobicidad máxima media
$I_{dc}$	Índice de decrecimiento medio. $I_{dc} = H_{mx} / (\theta_{mx} - \theta_s)$
S	Área de la curva de hidrofobicidad
$\theta_{H=5s}$	Humedad a la que empieza a ser hidrófobo en WDPT
$\theta_{H=0}$	Humedad (g/g) a la que empieza a ser hidrófobo en MED
$H_s$	Hidrofobicidad suelos seco al aire
$H_{105^\circ}$	Hidrofobicidad a $105^\circ\text{C}$
$H_{CC}$	Hidrofobicidad a la humedad de capacidad de campo
$H_{PM}$	Hidrofobicidad a la humedad en el punto de marchitez

Se han relacionado estos índices (Tabla 2) con el contenido en M.O. Con el método WDPT únicamente se observa una ligera tendencia positiva con S y con el método MED se obtienen ligeras correlaciones positivas con  $H_{105^\circ}$ ,  $\theta_{H=0}$  y  $H_s$ , y negativa con  $I_{dc}$ . De Jonge et al. (1999) obtuvo una buena correlación entre M.O y S usando MED.

### 3.6. Implicaciones hidrológicas

Se ha evaluado cómo se distribuye el carácter hidrófobo de los suelos bajo condiciones climáticas húmedas (humedad del suelo elevada) y secas (humedad del suelo baja) utilizando el modelo WDPT- $\theta$  (con mayor significado hidrológico que MED- $\theta$ ) (Fig.5). Cuando el contenido de humedad del suelo es elevado (periodos de lluvias en invierno y primavera) predominan los suelos no hidrófobos (19% de los suelos cuando  $\theta = 140$  g/g y 24% cuando  $\theta = 120$  g/g) y con persistencia moderada (19% de los suelos cuando  $\theta = 140$  g/g y 31% cuando  $\theta = 120$  g/g). Cuando las lluvias ya no son tan intensas y los periodos secos se suceden (en verano) se observa que los suelos de la cuenca muestran una persistencia extrema de la hidrofobicidad, con lo que si se producen lluvias en verano este agua no infiltrará rápidamente como ocurriría en suelos no repelentes si no que será susceptible a procesos de evaporación (Bauters et al., 2000; Michel et al., 2001) y serán necesarios periodos de lluvia continuados para que el frente de humedecimiento atraviese el horizonte repelente al agua. Estas condiciones favorecen la creación de zonas secas y flujos preferenciales (Wallis y Horne, 1992).

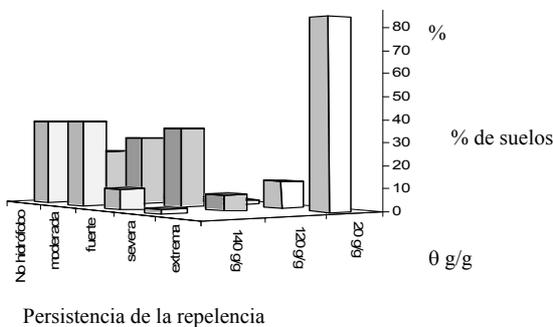


Fig. 5. Porcentaje de los suelos en función de su contenido de humedad y de la persistencia de la hidrofobicidad (WDPT).

Se han evaluado los riesgos de erosión que potencialmente existen en la cuenca. La figura 6 representa la cuenca experimental, la malla de puntos en donde se extrajo muestra de suelo procedente del segundo muestreo (ver 2.2) y la pendiente de cada suelo clasificada en moderada: círculo blanco, severa: círculo rayado y extrema: círculo negro. Mediante el modelo empírico WDPT- $\theta$  se determinó  $t_i$  cuando los suelos estaban a  $\theta_{cc} \approx 120$  g/g y cuando estaban secos al aire ( $\theta_s \approx 20$  g/g).

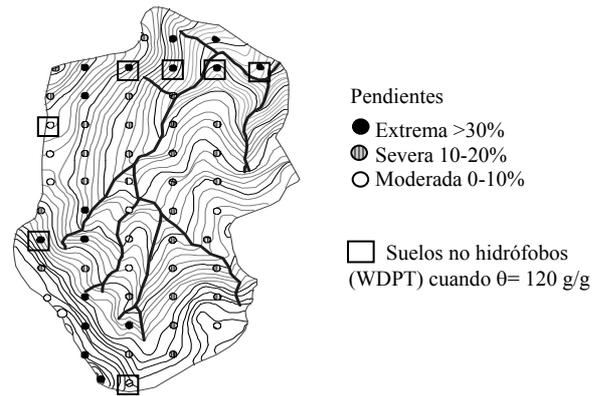


Fig. 6. Riesgo de erosión en la cuenca experimental. Distribución de los puntos del muestreo sistemático (círculos) y las pendientes (textura de los círculos de la cuenca (curvas de nivel cada 5m).

Se han relacionado las pendientes con el carácter hidrófobo de los suelos. Para el caso en el que los suelos están a  $\theta_{cc}$ , el 12% de los suelos potencialmente mostrarían riesgo de erosión por escorrentía (Fig.6), en el resto de los suelos se destaca que el 16% presentan potencialmente el mayor riesgo de erosión (pendiente extrema e hidrófobo). En el caso de los suelos a  $\theta_s$ , no se observa ningún suelo que no sea hidrófobo, con lo que se podría decir que los suelos situados en pendientes  $>30\%$  (círculos negros) son los que presentan mayor riesgo de erosión si después de un periodo seco se produjeran lluvias fuertes (27% de los suelos).

### 4. Conclusiones

En los suelos estudiados la hidrofobicidad no permanece estable si no que varía fuertemente con el contenido de humedad de los suelos, mostrando una evolución no monótona. Se observa que el contenido crítico de humedad en el cual la hidrofobicidad empieza a aparecer está próximo a la humedad a capacidad de campo de cada suelo y la máxima persistencia de la hidrofobicidad es alcanzada próxima al punto de marchitez. Este comportamiento de la hidrofobicidad en función de la humedad del suelo puede ser modelado mediante ecuaciones sencillas (descritas en este trabajo).

Los suelos con carácter no alofánico (organomineral) y alto contenido en materia orgánica están relacionados con los suelos que presentan repelencia al agua. También se ha observado que el contenido en materia orgánica por si solo no explica las variaciones en el grado y la persistencia de la hidrofobicidad. Igualmente el alto contenido de materia orgánica en los suelos puede aumentar el contenido de humedad en el cual los suelos empiezan a ser hidrófobos, aumentar el grado de hidrofobicidad en suelos secados a  $105^\circ$  C y ralentizar la recuperación de los suelos. Otros factores como la vegetación deben ser estudiados con mayor detalle.

Debido a las diferencias en la hidrofobicidad cuando es medida en función de la humedad y para caracterizar mejor el carácter hidrófobo de los suelos es conveniente evaluar la hidrofobicidad de los suelos no sólo cuando están secos al aire, si no también a diferentes humedades, como por ejemplo las determinadas a 0.3, 1 y 15 bar (características de cada suelo).

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado con fondos del proyecto de INIA RTA 01-97. Los autores quieren agradecer la colaboración inestimable del Parque Nacional de Garajonay y especialmente a Luis Antonio Gómez G., a Silvia Armas E. por la colaboración en la química de suelos (Departamento de Edafología, e los lípidos de los suelos).

## Referencias

- Bauters, T. W. J., T. S. Steenhuis, D.A. DiCarlo, J.L. Nieber, L.W. Dekker, C.J. Ritsema, J.-Y. Parlange y R. Haverkamp. 2000. Physics of water repellent soils. *J. Hydrol.* 231-232: 233-243.
- Blakemore, L.C., P.L. Searle y B.K. Daly. 1987. Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10A.
- Bond, R.D. 1969. The occurrence of water-repellent soils in Australia. Proc. Symp. Water Rep. Soils, Univ. Calif., Riverside.
- Carrillo, M.L.K., J. Letey y S.R. Yates. 1999. Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:433-436.
- Chang, K.Y. 1992. Development of seasonal water repellency under direct drilling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:326-329.
- DeBano, L.F. 1981. Water repellent soils: A state of the art, Gen. Tech. Rep. PSW-46, p. 21, Pac. Southwest For. and Range Exp. Stn., U.S. Dep. of Agric., Berkeley, Calif.
- De Jonge, L.W., O.H. Jacobsen y P. Moldrup. 1999. Soil water repellency: effects of water content, temperature, and particle size. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:437-442.
- Dekker, L.W. y C.J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.* 30:2507-2517.
- Dekker, L.W. y C.J. Ritsema. 1996. Uneven moisture patterns in water repellent soils. *Geoderma* 70:87-99.
- Dekker, L.W. 1998. Moisture variability resulting from water repellency in dutch soils, Tesis Doctoral, Wagenengen Agricultural University, Wageningen.
- Díaz-Fierros, F. 1977. Efectos del almacenaje sobre las propiedades físicas y biológicas de muestras tamizadas de suelos orgánicos, p. 69-79 *Anales de edafología y agrobiología*, Vol. 36.
- Dekker, L.W., C.J. Ritsema y K. Oostindie. 2000. Extend and significance of water repellency in dunes along the Dutch coast, *Journal of Hydrology* 231-232:112-125.
- DiCarlo, D.A., Bauters, T.W.J., Darnault, C.J.G., Steenhuis, T.S., Parlange, J.-Y., 1999a. Rapid determination of constitutive relations with fingered flow. En: Proc. International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Riverside, CA. October 22-24, 1997, pp. 433-440.
- Doerr, S.H., R.A. Shakesby y R.P.D. Walsh. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51:33-65.
- Franco, C.M.M., M.E. Tate y J.M. Oades. 1995. Studies on non-wetting sands. I. The role of intrinsic particulate organic matter in the development of water-repellency in non-wetting sands. *Australian Journal of Soil Research* 33:253-263.
- Jaramillo, D.F. 1999. Caracterización química de Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño. *Revista Nacional de Agronomía Medellín.* 52(2): 657-673.
- Jaramillo, D.F. 2001. Evaluación del método WDPT para medir la repelencia al agua en andisoles de Antioquia. *Revista del ICNE Vol. 7 N°1:* 63-70. 2001.
- Jaramillo, D.F., L.W. Dekker, C.J. Ritsema, y J.M.H. Hendrickx. 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *J. Hydrol.* 231:105-111.
- Jaramillo, D.F. 2003. Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la repelencia al agua en andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Informe de investigación, Escuela de Geociencias, Univ. Nacional de Colombia, Medellín.
- 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. *Australian Journal of Soil Research* 19, 275-285.
- Klute, A. 1986. *Methods of Soil Analysis*. 2nd. Ed. Agronomy monograph no.9: Madison: ASA-SSSA.
- Letey, J. 1969. Measurement of contact angle, water drop penetration time and critical surface tensions. Proc. Symp. Water Rep. Soils, Univ. Calif., Riverside.
- Maeda, T. y K. Soma. 1992. Physical properties of Andosols. *Suelos Ecuatoriales* 9 (1): 16-24.
- M.A.P.A. 1994. *Métodos oficiales de análisis*. Tomo III. Ed. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Michel, J.C., L.M. Riviere, y M.N. Bellon-Fontaine. 2001. Measurement of the wettability of organic materials in relation to water content by the capillary rise method. *European J. of Soil Science* 52:459-467.
- Moral, F.J., J.V. Giráldez, A.M. Laguna. 2002. La hidrofobia en los suelos arenosos del Parque Natural de Doñana: Caracterización y distribución. *Ingeniería del agua*. Vol. 9 n°1.
- Pérez de Paz, P.L. 1990. Parque Nacional de Garajonay patrimonio mundial. Ed. ICONA.
- Roy, J.L., y W.B. McGill. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Science* 167:83-97.
- Shakesby, R.A., C. de O.A. Coelho, 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. In: Sala, M., Rubio, J.L. Eds. *Soil erosion as a consequence of forest fires*. Geoforma Ediciones, Logroño, pp. 15-27.
- Scott, D.F. y D.B. Van Wyk. 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment. *Journal of Hydrology* 121,239-256.
- Valat, B., C. Jouany y L.M. Rivière. 1991. Characterization of the wetting properties of air dried peats and composts. *Soil Science*, 152, 100-107.
- van Dam, J.C., J.H.M. Wösten, y A. Nemes. 1996. Unsaturated soil water movement in hysteretic and water repellent field soils. *J. Hydr.* 184:153-173.
- Wallis, M.G., D.J. Horne y K.W. McAuliffe. 1990. A study of water repellency and its amelioration in a yellow brown sand. I. Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion. *N.Z. J. Agr. Res.* 3: 139-144.
- Wallis, M.G. y D.J. Horne. 1992. Soil water repellency. *Advances in Soil Science* 20, 91-146.

