

LA CURVA DE RETENCIÓN DE UN SUELO HIDRÓFUGO: DESARROLLO DE UN MODELO FÍSICO Y SU VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL

C. M. Regalado¹, A. Ritter²

¹ Dep. Suelos y Riegos, Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife, cregalad@icia.es.

² Dep. Ingeniería, Producción y Economía Agraria, Universidad de La Laguna, Ctra. Geneto, 2; La Laguna, 38200 Tenerife, aritter@ull.es

RESUMEN. La existencia de un recubrimiento hidrófugo orgánico sobre la superficie de las partículas del suelo puede modificar su humectabilidad, cuantificada en términos del ángulo de contacto de la interfaz agua-aire-suelo. Es de esperar por tanto que, entre otros, la curva de retención de agua en el suelo se vea afectada por el consecuente cambio en la superficie de las paredes de los poros. Se desarrolla un modelo con base física de la curva característica de un suelo hidrófugo, en el que los parámetros de forma se definen en términos de los estadísticos de la distribución de poros y el ángulo de contacto. Las predicciones del modelo se compararon con medidas de retención en un suelo orgánico forestal hidrófugo y su correspondiente homólogo hidrófilo. Se encontró que la presión de burbujeo o estado de entrada de aire es un parámetro relevante para definir la hidrofobicidad. Se propone un mecanismo para explicar en qué medida las distintas componentes que intervienen en la retención del suelo estudiado, tales como estructura, hidrofobicidad y materia orgánica, afectan a la curva característica durante un proceso de secado.

ABSTRACT. The existence of an organic hydrophobic coating on the surface of soil particles may modify the soil's wettability, quantified in terms of the contact angle of the water-air-soil interface. It is therefore expected that, among others, the water retention curve would be consequently affected by the change in the surface of pore walls. We develop a physically based model of the characteristic curve of a hydrophobic soil, in which the model's shape parameters are defined in terms of the statistics of the soil's pore distribution and the contact angle. The model predictions were compared with water retention measurements of a hydrophobic organic forest soil and its corresponding hydrophilic counterpart. We found that the air entry value or soil bubbling pressure is a relevant parameter to define the soil's hydrophobicity. We propose a mechanism to explain how the various components involved in the retention of the studied soil, such as structure, hydrophobicity and organic matter, affect the soil-water characteristic curve during a drying process.

La hidrofobicidad o repelencia al agua puede modificar características hidrológicas de un suelo, tales como su conductividad hidráulica (Wallis et al., 1990; van Dam et al., 1996), la estabilidad en el frente de avance de mojado (Wallis y Horne, 1992; Nieber et al., 2000), o la curva de retención (Bauters et al., 1998; Bachmann y van der Ploeg, 2002; Arye et al., 2007; Czachor et al., 2010; Karunarathna et al., 2010a; b), pudiendo originar flujo preferencial, escorrentía o erosión en la zona no saturada (Bauters et al., 1998; Wang et al., 2000; Miyata et al., 2007). En sentido estricto se admite la hidrofobicidad cuando el ángulo de contacto, β , correspondiente al ángulo formado en la interfaz agua-aire-suelo entre el menisco y la pared de un poro o tubo capilar, es distinto de cero. Así por ejemplo, si $0 < \beta < 90^\circ$ se considera que la humectabilidad es parcial y que el suelo presenta repelencia sub-crítica (Tillman et al., 1989); si $\beta > 150^\circ$ hay super-hidrofobicidad (McHale et al., 2007). El intervalo $90 < \beta < 120^\circ$ es el más frecuentemente encontrado en suelos hidrófugos (Roy y McGill, 2002; Regalado y Ritter, 2005; Regalado et al., 2008). Además se ha observado que el ángulo de contacto medido con la prueba más aceptada de hidrofobicidad no es constante sino que varía de forma no lineal con la humedad del suelo, θ (King, 1981; Wallis et al., 1990; de Jonge et al., 1999; Goebel et al., 2004; Regalado y Ritter, 2005; de Jonge et al., 2007; Kawamoto et al., 2007). En el mejor de los casos dicho ángulo β sólo puede sin embargo entenderse como un ángulo de contacto aparente o efectivo, dado que la descripción real de un suelo es más compleja que la proporciónada por el análogo de un conjunto de capilares empaquetados de forma regular (Philip, 1971). Sobre esta simplificación se basan sin embargo muchos modelos hidrológicos, entre ellos el de la curva de retención, que describe la relación existente entre la humedad, θ , y la succión, Ψ . Es de esperar que en un suelo hidrófugo un mayor ángulo de contacto conlleve una menor retención de agua que en el correspondiente homólogo hidrófilo (Bauters et al., 1998). Sin embargo, la curva de retención de suelos naturalmente hidrófugos o *hidrofobizados* artificialmente muestra un marcado carácter *histerético*, observándose comportamientos antagónicos cuando se compara la rama de desecación y la de humectación con la correspondiente muestra hidrófila (Morrow, 1975; Bauters et al., 1998; Ustohal et al., 1998; Karunarathna et al., 2010a). Para una descripción matemática de la curva de retención de suelos hidrófugos se han usado funciones analíticas ajustadas a los datos experimentales tales como la de Brooks-Corey

1.- Introducción

(Ustohal et al., 1998; Karunarathna et al., 2010a); van Genuchten unimodal (van Dam et al., 1996; Karunarathna et al., 2010a; b) y bimodal (Kawamoto et al., 2007); o una modificación de este última en la que los parámetros de forma n y α dependen del ángulo de contacto que a su vez varía con la humedad del suelo: $n=n(\beta(\theta))$ y $\alpha=\alpha(\beta(\theta))$ (Arye et al., 2007; Bachmann et al., 2007). Además de los modelos empíricos de Brooks-Corey y de van Genuchten, existen otros basados en una descripción estadística de la distribución del tamaño de poros en un suelo (Kosugi, 1994). La diferencia básica del modelo de Kosugi frente a los anteriores es que los parámetros del primero cuentan con significado en términos de los estadísticos de la distribución de poros, tales como su desviación típica o la mediana. Es objetivo de este trabajo generalizar el modelo de Kosugi (1994) para suelos hidrófugos.

2.- El modelo

2.1- Suelo hidrófilo

La relación de Young-Laplace establece que la altura de un líquido o presión (Ψ) en un tubo capilar de radio (r) es proporcional al coseno del ángulo de contacto (β), formado entre el menisco y la pared del tubo, e inversamente proporcional al radio. Si denotamos A como la constante de proporcionalidad, entonces:

$$\Psi = -A \cos \beta / r, \quad A > 0 \tag{1}$$

Aplicada al suelo, podemos definir la distribución de radios de poro $f(r)$ en función del contenido de humedad como:

$$f(r) = d\theta / dr \tag{2}$$

Si se supone que $f(r)$ es una función de tipo log-normal:

$$f(r) = \frac{\theta_s - \theta_r}{r_{max} - r} \frac{r_{max}}{\sigma r \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{\left(\ln \left[\frac{r}{r_{max} - r} \right] - \mu \right)^2}{\sigma^2} \right\} \tag{3}$$

donde θ_s y θ_r corresponden, respectivamente, a la humedad del suelo en saturación y residual, y r_{max} es el máximo radio de poro ($0 < r < r_{max}$). La siguiente igualdad relaciona μ y la mediana de la distribución de radios (r_{med}):

$$\mu = \ln \left(\frac{r_{med}}{r_{max} - r_{med}} \right) \tag{4}$$

y por tanto, por conveniencia, podemos reescribir (3) en términos de r_{med} como:

$$f(r) = \frac{\theta_s - \theta_r}{r_{max} - r} \frac{r_{max}}{\sigma r \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{\left[\ln \left[\frac{r}{r_{med}} \frac{r_{max} - r_{med}}{r_{max} - r} \right] \right]^2}{2\sigma^2} \right\} \tag{5}$$

Sustituyendo (5) en (2), integrando y haciendo uso de (1) para el caso trivial $\beta=0$ que representa un mojado

perfecto, obtenemos la siguiente expresión (Kosugi, 1994):

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{\sigma \sqrt{2}} \ln \left(\frac{\Psi_{max} - \Psi}{\Psi_{max} - \Psi_{med}} \right) \right], \quad \Psi < \Psi_{max} \tag{1}$$

$$Se = 1, \quad \Psi \geq \Psi_{max}$$

que relaciona la succión en un suelo (Ψ) con la humedad efectiva (Se) en términos de la función de error complementaria

$$\operatorname{erfc}(z) = \int_z^\infty e^{-y^2} dy, \tag{7}$$

la mediana del potencial matricial, Ψ_{med} ($Se(\Psi_{med})=0.5$) y la presión de burbujeo o estado de entrada de aire (agua), Ψ_{max} , definida como la presión máxima a la que se mantiene conectada por agua una red de poros.

2.2- Suelo hidrófugo

En un suelo hidrófugo, donde $\cos \beta \neq 1$, suponiendo que el ángulo de contacto varía con la succión $\beta=\beta(\Psi)$, se propone una versión generalizada de la expresión (1) de Young-Laplace como:

$$\Psi = -A \cos \beta(\Psi) / r \tag{8}$$

Dado que no se ha derivado a partir de principios elementales, la dependencia de $\cos \beta(\Psi)$ en (8) debe asumirse como empírica. Aunque general, la función $\cos \beta(\Psi)$ en (8) es en principio desconocida, debido a que β es un ángulo de contacto aparente que no es equiparable con el determinado por ejemplo a partir de las pruebas habituales de hidrofobicidad, debido a la diferente escala de observación (micro versus macroscópica), la topología y heterogeneidad de las superficies del medio poroso (Philip, 1971; Hassanizadeh y Gray, 1993; Boinovich y Emelyanenko, 2011). Los resultados experimentales de Morrow (1976) muestran sin embargo una aceptable correlación entre el ángulo de contacto medido con líquidos de diferente tensión superficial en columnas de teflón porosas y el obtenido sobre superficies lisas de teflón, lo que proporciona cierta base para suponer que β guarda relación con el ángulo de contacto real. Por tanto, y motivados por resultados anteriores (Regalado y Ritter, 2005; Regalado et al., 2008) donde se determinó cómo variaba de forma no lineal el ángulo de contacto determinado con el ensayo MED (Roy y McGill, 2002) a medida que disminuía la humedad del suelo, se admite, por sencillez, que la función $\cos \beta(\Psi)$ es del tipo: $\cos \beta(\Psi)=a_1 \exp(-a_2 \Psi)$ (recuadro en Fig. 1). Los resultados descritos a continuación no están sin embargo supeditados a la forma exacta en que $\cos \beta(\Psi)$ varía con la succión.

En términos de Ψ , la integración de (2) entre el valor de humedad residual θ_r (a $r=0$) y un valor de humedad arbitrario θ puede escribirse como:

$$\theta - \theta_r = \int_{\Psi'=-\infty}^{\Psi'=\Psi} f(r') \left(\frac{dr'}{d\Psi'} \right) d\Psi' \tag{9}$$

donde el límite inferior de integración en (9) se calcula a partir de (8) como:

$$r \rightarrow 0 \Rightarrow \Psi \rightarrow -A \cos \beta(\Psi) / 0 = -\infty \tag{10}$$

Sustituyendo (5) en (9) haciendo uso de (8), obtenemos la siguiente expresión en términos de la función de error complementaria (7):

$$Se = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} [y] \quad (11)$$

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \ln \left(\frac{\Omega_{med} (\cos \beta - \Omega_{max} \Psi)}{\cos \beta (\Omega_{med} - \Omega_{max})} \right) \quad (12)$$

donde Ω_{med} y Ω_{max} ($\Omega_{med} \neq \Omega_{max} \neq 0$) representan, respectivamente, la mediana y la moda del cociente $\cos \beta / \Psi$. Nótese que para $\cos \beta$ constante (11)-(12) se reducen al caso trivial (6). En el modelo que nos ocupa, $\cos \beta(\Psi) = a_1 \exp(-a_2 \Psi)$, si redefinimos el siguiente conjunto de parámetros:

$$\bar{\Omega}_{med} = 1 - \frac{\Omega_{max}}{\Omega_{med}}; \quad \bar{\Omega}_{max} = \frac{\Omega_{max}}{a_1}, \quad (13)$$

la expresión (12) se reduce a:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \ln \left(\frac{1 - \bar{\Omega}_{max} \Psi \exp(-a_2 \Psi)}{\bar{\Omega}_{med}} \right) \quad (14)$$

3.- Materiales y métodos

3.1.- Determinación de las curvas de retención

Se llevaron a cabo dos conjuntos de experimentos (I y II) usando en ambos casos un suelo forestal franco arenoso (arcilla: 8.2%; limo: 16.0%; arena: 75.8%), cuya densidad aparente en campo era 0.6 g cm^{-3} , con un contenido en materia orgánica del 48% (determinada mediante calcinación a $540 \text{ }^\circ\text{C}$). En ambos experimentos I y II se midió la curva de retención de agua en la rama de desecación primaria mediante un sistema de células Tempe que consiste en una serie de cámaras de presión, cerradas en la parte inferior por una placa porosa de 100 kPa de presión de burbujeo, en cuyo interior un anillo de 305 cm^3 relleno de suelo saturado es sometido, mediante inyección de aire, a incrementos de presión, $P = 0, 0.5, 1.0, 2.5, 4.0, 5.0, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 90 \text{ kPa}$. Se midió el volumen de líquido evacuado en cada incremento de presión, que se convirtió en peso a través de la densidad del líquido lixiviado y posteriormente en humedad volumétrica (θ) de la muestra del anillo. La relación de parejas de datos θ versus $P = -\Psi$ conforman así la curva de retención del suelo. En el experimento I se usaron, en muestras triplicadas, anillos de: a) el suelo original inalterado; b) tamizado a 2 mm y empaquetado; c) tamizado a 2 mm, calcinado a 540°C para eliminar la materia orgánica, y posteriormente empaquetado. Mediante los ensayos MED (Roy y McGill, 2002) y WDPT (Letey, 1969) se verificó que el tratamiento de calcinación eliminó completamente el carácter hidrófugo del suelo original. Para asegurar un mojado uniforme en las muestras alteradas, previo al empaquetado, éstas se humedecieron primero manejando manualmente el suelo desde la humedad de campo ($\sim 0.73 \text{ kg kg}^{-1}$). Posteriormente los anillos de suelo (alterados e inalterados) se saturaron mediante inmersión, elevando el nivel de agua de forma

progresiva para facilitar la salida del aire. En el experimento II se usaron, igualmente por triplicado, muestras de suelo tamizado a 2 mm que fueron empaquetadas en los anillos y saturadas con: a) agua; b) etanol al 96% vol.; c) una solución acuosa del humectante AquaGro-L (Aquatrols, EE.UU.). Dado su carácter volátil, en las muestras saturadas con etanol, y como medida de control, además de medir el volumen evacuado en las células, se pesó el conjunto celda+suelo saturado en cada incremento de presión para determinar posibles pérdidas que pudieran haberse producido por evaporación del líquido. Adicionalmente, para minimizar dichas pérdidas, el lixiviado de etanol se recogió en botellas de vidrio mediante un sistema cerrado de mangueras. Finalmente, el valor de humedad residual, θ_r , se determinó a partir de medidas a 1500 kPa en ollas de Richards, en muestras triplicadas de suelo tamizado, no tamizado y calcinado.

3.2.- Ajustes de las curvas de retención

Para el ajuste de las curvas de retención (caso hidrófugo e hidrófilo) se usó un procedimiento de simulación inversa basado en un algoritmo de optimización global, como es el GMCS-NMS. Éste combina secuencialmente el GMCS (*Global Multilevel Coordinate Search*) desarrollado por Huyer y Neumaier (1999) y el algoritmo *Nelder Mead Simplex* de búsqueda local (Nelder y Mead, 1965). En estudios previos se ha aplicado con éxito el GMCS-NMS para la estimación de las propiedades hidráulicas de suelos (Lambot et al., 2002; Ritter et al., 2003; 2004). La función objetivo a minimizar es la suma del cuadrado de los residuos:

$$OF(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^n [Se_i^* - Se_i(\Psi, \mathbf{b})]^2 \quad (15)$$

siendo \mathbf{b} el vector de parámetros $[\sigma; \bar{\Omega}_{med}; \bar{\Omega}_{max}; a_2]$.

4.- Resultados y discusión

4.1.- Predicción del modelo

En la Fig. 1 se muestran las predicciones del modelo (6) de Kosugi (1994) para el caso de un hipotético suelo hidrófilo ($\cos \beta = 1$), y el modelo extendido (11), (14) para un suelo hidrófugo cuyo ángulo de contacto varía con la succión, mostrando el efecto de la presión de burbujeo. La introducción de una función que da cuenta de la hidrofobicidad provoca en la respuesta de la curva de retención un efecto similar al que desempeña la presión de burbujeo, Ψ_{max} , en el modelo (6) original de Kosugi (1994), esto es, la saturación efectiva se mantiene constante en el intervalo próximo a la unidad. A medida que varía Ω_{max} el efecto es más pronunciado.

4.2.- Curvas de retención

En la Fig. 2a se muestran la serie de datos de retención del experimento denominado como I. Para mejor comparación de las curvas entre suelos con distinto tratamiento, la humedad se expresa como grado de saturación efectiva, Se . Para $pF < 3$ las pendientes del suelo inalterado y el hidrófilo son similares, lo que indica que durante el proceso de secado el agua es liberada con la misma rapidez. No ocurre

así con el suelo empaquetado orgánico, cuya pendiente es menor.

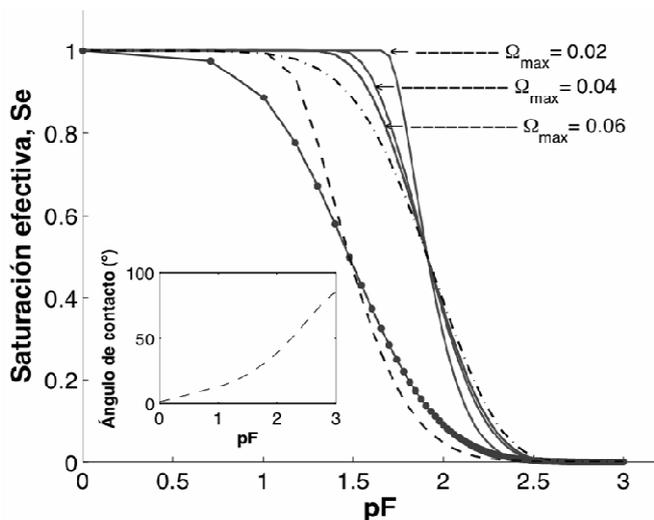


Fig. 1. Curvas de retención según el modelo de Kosugi (1994) (6): $\sigma=0.9$, $\Psi_{med}=30$ cm, $\Psi_{max}=0$ (—●—); $\Psi_{max}=40$ cm (- - -) y el modelo extendido (11)-(12): $\Omega_{med}=0.01$, $\Omega_{max}=0$ (-·-·-); $\Omega_{max}=0.02, 0.04, 0.06$ (—). El gráfico del recuadro muestra la función $\beta=\cos^{-1}(a_1\exp(-a_2\Psi))$ ($a_1=1$; $a_2=0.0025$). Se ha usado el criterio $\Psi>0$ y por tanto los parámetros se consideran positivos.

Resulta por tanto obvio que la estructura es relevante desde el punto de vista de la retención del suelo, dado que las muestras orgánicas empaquetadas e inalteradas exhiben comportamientos hidrológicos diferentes. Los resultados parecen indicar que la estructura podría en parte compensar el carácter hidrófugo, dado que las muestras inalteradas se encuentran más próximas al suelo calcinado que las muestras orgánicas. Puede observarse que tanto el suelo inalterado como el empaquetado orgánico (hidrófugos) se sitúan por encima de las muestras en las que se ha eliminado la materia orgánica (hidrófilas). Ello es consecuencia de la distinta presión de burbujeo que exhiben los tres conjuntos de muestras (véase también Fig. 2 en Bauters et al., 1998). Podemos por tanto inferir que el punto de entrada de aire es decisivo a la hora de definir el comportamiento hidrológico de un suelo hidrófugo. Como la ausencia o presencia de materia orgánica puede complicar la comprensión del fenómeno de retención, ya que afecta concomitantemente tanto a la estructura como a la retención de agua y la hidrofobicidad de un suelo, se diseñó un segundo conjunto de experimentos (II en Materiales y métodos) donde se mantuvo el mismo suelo orgánico de partida en tres ensayos diferentes y se varió el líquido de saturación: agua, etanol o un humectante comercial (AquaGro-L). Las muestras de suelo saturadas con líquidos con baja tensión superficial y por tanto mayor capacidad de mojado, como son el etanol y el AquaGro-L, presentan curvas de retención similares (Fig. 2b). La curva de retención de las muestras saturadas con agua se sitúa por encima de éstas. Por tanto las primeras (etanol y AquaGro-L) se comportan como “hidrófilas” en el sentido que lo hacen las muestras no-orgánicas en la Fig. 2a, mientras que las muestras saturadas con agua exhiben un carácter

marcadamente hidrófugo. Dado que en este caso los tres conjuntos de muestras presentan contenidos en carbono equivalentes, podemos concluir que las diferencias observadas se deben al carácter hidrófugo conferido por la materia orgánica y no a su capacidad de retención o efecto sobre la estructura del suelo. Nótese que, para el rango $2<pF<3$, las muestras saturadas con etanol o el humectante presentan mayores valores de humedad que las muestras no-orgánicas (Fig. 3). Ello sugiere que la presencia de materia orgánica incrementa la retención del suelo. Este hecho sin embargo no es suficiente para conferir al suelo los altos valores de retención, consecuencia de la hidrofobicidad, presentes en las muestras orgánicas saturadas con agua. En ese mismo rango $2<pF<3$ muestras inalteradas y muestras alteradas saturadas con etanol o AquaGro-L presentan valores de retención similares (comparar Fig. 2a y 2b), lo que sugeriría que el efecto de la estructura del suelo sería relevante sólo para rangos de $pF<2$. Al igual que en el experimento I, las diferencias entre muestras en el experimento II se deben a la distinta presión de burbujeo de las muestras “hidrófilas” e hidrófugas (Fig. 2b).

El resultado de los ajustes del modelo definido por (11), (14)(14) se recoge en la Tabla 1. En general el ajuste de los datos experimentales es satisfactorio con valores de coeficiente de eficiencia $C_{eff} \geq 0.98$ y raíz del error cuadrático medio $RMSE \leq 0.0137$.

Tabla 1. Parámetros e índices de bondad de ajuste del modelo (11)(11), (14).

	σ	$\bar{\Omega}_{med}$	$\bar{\Omega}_{max}$	a_2	C_{eff}	$RMSE$
Agua	2.048	-2.26E-02	-0.201	-1.25E-03	0.9974	0.0037
AquaGro-L	2.201	-3.06E-01	-3.183	1.20E-03	0.9993	0.0034
Etanol	3.030	-1.46E+00	-16.640	-4.05E-05	0.9991	0.0038
No-orgánico	1.670	2.94E-02	0.224	4.98E-04	0.9953	0.0137
Orgánico	1.044	7.21E-03	0.216	-1.25E-06	0.9806	0.0069
Inalterado	0.377	8.31E-03	0.451	1.57E-03	0.9979	0.0071

4.3.- Mecanismo de actuación

En la Fig. 3 se esquematiza un posible mecanismo que explicaría en qué medida las distintas componentes que intervienen en la retención del suelo estudiado, tales como estructura, hidrofobicidad y materia orgánica, afectan a la curva característica. Así por ejemplo se considera que los efectos de la materia orgánica e hidrofobicidad son aditivos, y provocarían que, cuando ambos están presentes, la curva pF varíe desde la parte más baja hasta el rango más alto de saturación efectiva. En este sentido, la presencia de materia orgánica por si sola aumentaría la retención del suelo hasta un nivel intermedio que sería suplementado por la repelencia (flechas punteadas en dirección ascendente en Fig. 3). La estructura operaría en sentido opuesto a los anteriores, reduciendo la retención para rangos altos de succión ($pF>1.5$) y llevando la curva característica desde el nivel superior de las muestras alteradas orgánicas a niveles de saturación efectiva equivalentes al de muestras hidrófilas (flechas punteadas en dirección descendente en Fig. 3).

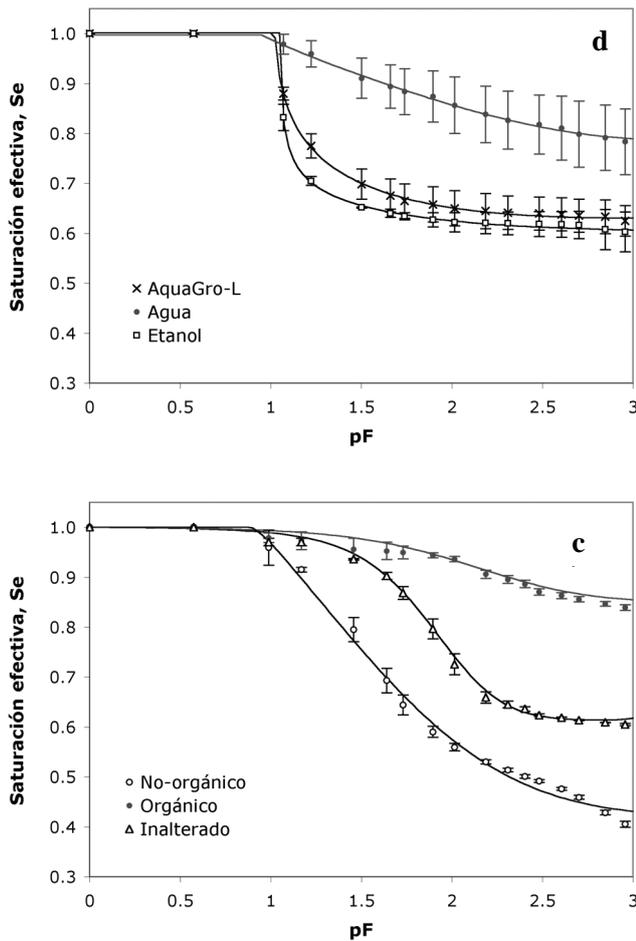


Fig. 2. Curvas de retención medidas (símbolos) y ajustadas (líneas) para el conjunto de experimentos a) I y b) II. Las barras de error representan \pm la desviación típica de los valores de S_e medidos en tres muestras.

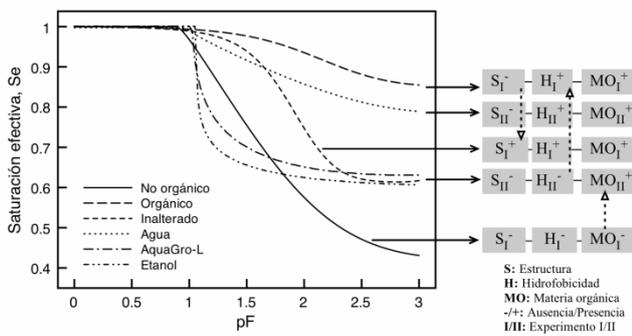


Fig. 3. Esquema indicando la distinta contribución de estructura (S), hidrofobicidad (H) y contenido en materia orgánica (MO) a la curva de retención del suelo. La dirección de las flechas punteadas indica una contribución de las distintas componentes S, H y M positiva (hacia arriba) o negativa (hacia abajo) sobre la retención de agua.

5.- Conclusiones

Se estudió la curva de retención de un suelo orgánico forestal. Los experimentos mostraron que la presencia de materia orgánica incrementó la capacidad de retención del suelo cuando se compararon curvas características obtenidas durante un proceso de secado. Dicho incremento es debido en gran medida al mayor ángulo de contacto

(hidrofobicidad) que confiere al suelo la materia orgánica, y más concretamente a su efecto sobre el valor del punto de entrada de aire. La estructura del suelo resultó también relevante, reduciendo la retención en el rango $pF > 1$ compensando en parte el carácter hidrófugo del suelo, lo que sugiere que resultados previos, obtenidos a partir de muestras alteradas, deban tomarse con cautela a la hora de extrapolarlos a condiciones de campo. Los datos se ajustaron satisfactoriamente al modelo de la curva de retención desarrollado originalmente por Kosugi (1994) y extendido en este trabajo para considerar el caso en el que el ángulo de contacto varía con la succión. Se cuenta por tanto con un modelo con cierta base física que permite incorporar la hidrofobicidad de un suelo en modelos hidrológicos de transporte de agua en la zona no saturada de, por ejemplo, suelos forestales con un alto contenido en carbono, o suelos regados con aguas depuradas con una elevada carga orgánica. Merece atención futura, tanto desde el punto de vista del modelado como en la parte experimental, incorporar el efecto de histéresis, no contemplado en este trabajo, y de especial relevancia en el caso de suelos hidrófugos (Bauters et al., 1998). El modelo desarrollado permite igualmente la inclusión, a través de la función $\cos \beta$, de la rugosidad (superhidrofobicidad) y heterogeneidad química (coexistencia de zonas hidrófilas e hidrófugas) de la superficie de las partículas de suelo vía interacciones de Wenzel-Cassie (Or y Tuller, 2005). Todo ello sin menoscabo de que la función que relaciona el ángulos de contacto con la succión del suelo, empírica en nuestro caso, deba derivarse a partir de principios físicos elementales en futuros desarrollos del modelo.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado con fondos del INIA-Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias (Proyecto RTA2009-161). Los autores agradecen a A.R. Socorro Monzón (ICIA) la realización de los experimentos de calcinación y determinación de la textura del suelo.

6.- Referencias

Arye, G., Nadav, I. y Chen, Y. 2007. Short-range reestablishment of soil water repellency after wetting: Effect on capillary saturation relation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:692-702.

Bachmann, J. y van der Ploeg, R.R. 2002. A review on recent developments in soil water retention theory: Interfacial tension and temperature effects. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165:468-478.

Bachmann, J., Deurer, M. y Arye, G. 2007. Modeling water movement in heterogeneous water-repellent soil: 1. Development of a contact angle-dependent water-retention model. *Vadose Zone J.* 6:436-445.

Bauters, T.W.J., DiCarlo, D.A., Steenhuis, T.S. y Parlange, J.Y. 1998. Preferential flow in water-repellent sands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1185-1190.

Boinovich, L. y Emelyanenko, A. 2011. Wetting and surface forces. *Adv. Colloid Interface Sci.* 165:60-69.

Czachor, H., Doerr, S.H. y Lichner, L. 2010. Water retention of repellent and subcritical repellent soils: New insight from model and experimental investigations. *J. Hydrol.* 380: 104-111.

de Jonge, L.W., Jacobsen, O.H. y Moldrup, P. 1999. Soil water repellency: Effects of water content, temperature y particle size. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 437-442.

de Jonge, L.W., Moldrup, P. y Jacobsen, O.H. 2007. Soil-water content dependency of water repellency in soils: Effect of crop type, soil management, and physical-chemical parameters. *Soil Sci.* 172: 577-588.

Goebel, M.-O., Bachmann, J. Woche, S.K. Fischer, W.R. y Horton, R. 2004. Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 383-393.

- Hassanizadeh, S.M. y Gray, W.G. 1993. Thermodynamic basis of capillary pressure in porous media. *Water Resour. Res.* 29: 3389-3405.
- Huyer, W. y Neumaier, A. 1999. Global optimization by multilevel coordinate search. *J. Global Optim.* 14: 331-355.
- Karunaratna, A.K., Chhoden, T., Kawamoto, K., Komatsu, T., Moldrup P. y de Jonge, L.W. 2010a. Estimating hysteretic soil-water retention curves in hydrophobic soil by a mini tensiometer-TDR coil probe. En: Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Pags.: 58-61. Brisbane, Australia. Publicado en DVD.
- Karunaratna, A.K., Moldrup, P., Kawamoto, K., de Jonge L.W. y Komatsu, T. 2010b. Two-region model for soil water repellency as a function of matric potential and water content. *Vadose Zone J.* 9: 719-730.
- Kawamoto, K, P. Moldrup, T. Komatsu, L.W. de Jonge y M. Oda. 2007. Water repellency of aggregate-size fractions of a volcanic ash soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1658-1666.
- 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.
- Kosugi, K. 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention, *Water Resour. Res.* 30: 891-901.
- Lambot, S., Javaux, M., Hupet, F. y Vanclooster, M. 2002. A Global Multilevel Coordinate Search procedure for estimating the unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 38: 6/1- 6/15.
- Letey, J. 1969. Measurement of contact angle, water drop penetration time, and critical surface tension. En: LF De Bano, J Letey (eds.) Proc. Symp. Water Rep. Soils, Univ. Calif., Riverside, pags. 43-47.
- McHale, G., Shirtcliffe, N.J., Newton, M.I. y Pyatt, F.B. 2007. Implications of ideas on super-hydrophobicity for water repellent soil. *Hydrol. Proc.* 21: 2229-2238.
- Miyata, S., Kosugi, K., Gomi, T., Onda T. y Mizuyama, T. 2007. Surface runoff as affected by soil water repellency in a Japanese cypress forest. *Hydrol. Proc.* 21: 2365-2376.
- Morrow, N.R. 1975. The effects of surface roughness on contact angle with special reference to petroleum recovery. *J. Can. Petr. Technol.* 14: 42-53.
- Morrow, N.R. 1976. Capillary pressure correlations for uniformly wetted porous media. *J. Can. Petr. Technol.* 15: 49-69.
- Nelder, J.A. y R. Mead. 1965. A simplex method for function minimization. *Computer J.* 7: 308-313.
- Nieber, J.L., Bauters, T.W.J., Steenhuis T.S. y Parlange, J.-Y. 2000. Numerical simulation of experimental gravity-driven unstable flow in water repellent sand. *J. Hydrol.* 231-232: 295-307.
- Or, D. y Tuller, M. 2005. Capillarity. En: Hillel D. (ed.) *Encyclopedia of Soils in the Environment*, pp. 155-164. Elsevier Science, Oxford.
- Philip, J.R. 1971. Limitations on scaling by contact angle. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35:507-509.
- Regalado, C.M. y Ritter, A. 2005. Characterizing water dependent soil repellency with minimal parameter requirement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1955-1966.
- Regalado, C.M., Ritter, A., de Jonge, L.W., Kawamoto, K., Komatsu T. y Moldrup, P. 2008. Useful soil-water repellency indices: linear correlations. *Soil Sci.* 173: 747-757.
- Ritter, A., F. Hupet, R. Muñoz-Carpena, S. Lambot y M. Vanclooster. 2003. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agric. Water Manage.* 59: 77-96.
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., Regalado, C.M., Vanclooster M. y Lambot, S. 2004. Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil. *J. Hydrol.* 295: 124-139.
- Roy, J.L. y McGill. W.B. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Sci.* 167: 83-97.
- Tillman, R.W., Scotter, D.R., Wallis, M.G. y Clothier, B.E. 1989. Water repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Aust. J. Soil Res.* 27: 637-644.
- Ustohal, P., Stauffer, F. y Dracos, T. 1998. Measurement and modelling of hydraulic characteristics of unsaturated porous media with mixed wettability. *J. Contam. Hydrol.* 33: 5-37.
- van Dam, J.C., Wösten, J.H.M. y Nemes, A. 1996. Unsaturated soil water movement in hysteretic and water repellent field soils. *J. Hydrol.* 184: 153-173.
- Wallis, M.G. y Horne, D.J. 1992. Soil water repellency. *Adv. Soil Sci.* 20: 91-146.
- Wallis, M.G., Horne, D.J. y McAuliffe, K.W. 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.
- Wang, Z., Wu, Q.J., Wu, L. Ritsema, C.J., Dekker, L.W. y Feyen, J. 2000. Effects of water repellency on infiltration rate and flow instability. *J. Hydrol.* 231-232: 265-276.