

PARÁMETROS PARA LA CARACTERIZACIÓN ÓPTIMA DE LA REPELENCIA EN LA ZONA NO SATURADA

C.M. Regalado, A. Ritter, A.R. Socorro y A. Pérez-Buenafuente

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

RESUMEN. El grado de repelencia al agua en la zona no saturada se caracteriza normalmente en función de diferentes índices medidos a un contenido de humedad fijo, a pesar de que es conocida la dependencia de la repelencia con el contenido de humedad del suelo. En este trabajo se proponen parámetros de repelencia alternativos dependientes del contenido de humedad del suelo, derivados de medidas con el test de molaridad de la gota de etanol (MED). Se evalúa la idoneidad de dichos parámetros en función de sus propiedades estadísticas tales como normalidad, variabilidad y número mínimo de muestras necesarios. Se encontraron correlaciones entre algunos de dichos parámetros, que permiten la caracterización aproximada de la curva de repelencia de un suelo hidrófobo a partir de un número mínimo de muestras. Se diseña en consecuencia una estrategia en la que 29 muestras son suficientes ($p < 0.05$) para caracterizar la variación del grado de repelencia con el contenido de humedad de un suelo hidrófobo. El área debajo de la curva se propone como el parámetro clave para caracterizar la repelencia en la zona no saturada.

ABSTRACT. The degree of soil water repellency in the vadose zone is usually characterized in terms of parameters, which have been measured at a given water content, despite the fact that repellency is water dependent. We propose alternative water dependent repellency parameters, derived using the molarity of an ethanol droplet (MED) test. We study the suitability of such water-dependent repellency parameters based on their statistical properties: normality, variability and minimal number of determinations required. Useful correlations are found between some of these parameters, which allow an approximate characterization of the repellency curve with only a few determinations. A combination of parameter inter-dependence and minimum number of determinations provides a work-saving strategy for describing the repellency vs. water content curve. Following this strategy only 29 samples are sufficient ($p < 0.05$) to characterize the water-dependent repellency degree of the studied soil. The integrated area below the

curve is proposed as the key index for repellency characterization.

1. Introducción

La repelencia al agua está extendida en mayor o menor medida entre la mayoría de los suelos, tanto en aquellos de origen mineral como volcánico, con texturas tanto arenosa, franca como arcillosa (Wallis y Horne, 1992; Doerr et al. 2000; Jaramillo et al. 2000). La repelencia es consecuencia de una disminución en la energía libre de las partículas del suelo (Roy y McGill, 2002), debido al recubrimiento de las mismas por moléculas orgánicas anfífilas de origen vegetal, microbiano, o por ácidos húmicos y lípidos (Wallis y Horne, 1992). La repelencia en el suelo tiene importantes consecuencias sobre otros procesos hidrológicos que tienen lugar en la ZNS como la infiltración (Wallis et al. 1990; van Dam et al. 1996), el transporte de solutos (Bauters et al. 2000), la aparición de vías preferenciales (Jamison, 1945; Ma'shum y Farmer, 1985; Wallis y Horne, 1992) y la erosión (Shakesby et al. 1994), de ahí el particular interés de su estudio.

Existen en la actualidad varios métodos aceptados para medir el grado de repelencia de un suelo (Wallis y Horne, 1992; Letey et al. 2000). Los tests WDPT de las siglas inglesas "water drop penetration time" (Letey, 1969) y MED de "molarity of an ethanol droplet" (Roy y McGill, 2002) se recomiendan para suelos moderadamente repelentes. El primero proporciona una indicación de la persistencia en la hidrofobicidad de un suelo, mientras que el MED es una medida del grado de dicha repelencia. Para suelos débilmente repelentes o con repelencia subcrítica (Tillman et al. 1989) existen otros métodos como el de la altura capilar ("capillary rise" en inglés) (Letey et al. 1962), el infiltrómetro de tensión (Tillman et al. 1989) y más recientemente el método de la placa de Wilhelmy (Bachman et al. 2004). Basados en estas diferentes técnicas de medida se han propuesto a su vez varios índices de repelencia: (i) el índice MED referido como la molaridad M

de una solución de etanol necesaria para infiltrar en el suelo (King, 1981); (ii) la tensión superficial a 90° (“ninety-degree surface tension”) γ_{90° [mN m⁻¹], que se obtiene a partir de (King, 1981):

$$\gamma_{90^\circ} = 61.05 - 14.75 \ln(M + 0.5) \quad (1)$$

(iii) otra forma de expresar la repelencia es mediante el ángulo de contacto, α , que se forma entre un líquido humectante y la superficie del suelo. La γ_{90° está relacionada con el ángulo de contacto, α , a través de (Roy y Mc. Gill, 2002):

$$\cos \alpha = \sqrt{\gamma_{90^\circ} / \gamma_w} - 1 \quad (2)$$

siendo γ_w la tensión superficial de la interfase agua-aire (para 20°C $\gamma_w = 71.27$ mN m⁻¹) (Roy y Mc. Gill, 2002); (iii) por último la γ_{90° está relacionada con la tensión superficial de la interfase sólido-aire o energía libre superficial del sólido, γ_s [mN m⁻¹], mediante la siguiente relación de proporcionalidad (Carrillo et al. 1999):

$$\gamma_s = \gamma_{90^\circ} / 4\Theta^2 \quad (3)$$

siendo Θ una constante que varía entre 0.5 y 1.15. Nótese que tanto γ_{90° , como los índices MED y α son medidas equivalentes de repelencia pero su relación no-lineal (Ec. (2) y (3)) puede hacer variar las propiedades estadísticas de los mismos.

La repelencia de un suelo varía con su contenido de humedad, θ_g , de forma no-lineal (King, 1981; Wallis et al. 1990; 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; Derjaguin y Churaev, 1986; Goebel et al. 2004). Se desprende por tanto de este hecho que los índices de repelencia que acabamos de describir deben entenderse como dependientes del contenido de agua en el suelo. Sin embargo la repelencia normalmente se mide a un contenido de humedad fijo, sin tener en cuenta su dependencia con el contenido de humedad. Resulta por tanto de interés derivar parámetros de repelencia dinámicos que integren la variación de la repelencia con el contenido de humedad. Igualmente las propiedades estadísticas de dichos parámetros (normalidad, variabilidad y número mínimo de muestras) resultan de interés, por ejemplo para su inclusión en modelos de transporte y erosión.

Los objetivos del siguiente trabajo son: (i) proponer parámetros estáticos (independientes de la humedad del suelo) y dinámicos para cuantificar la curva de repelencia α - θ_g ; (ii) analizar sus propiedades estadísticas y correlación; y partir de estos resultados (iii) proporcionar una estrategia óptima para caracterizar la curva de repelencia frente al contenido de humedad de un suelo.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización del estudio

El área de estudio se sitúa en una cuenca forestal de laurisilva del Parque Nacional de Garajonay, La Gomera (Ritter y Regalado, 1999). Los suelos son de origen volcánico. La vegetación incorpora abundante materia orgánica al suelo siendo por tanto responsable de su carácter órgano-mineral.

2.2. Diseño del muestreo

Se realizó un estudio preliminar de propiedades fisico-químicas ($n=32$) en puntos elegidos al azar a cuatro profundidades (0-0.03; 0.03-0.23; 0.23-0.43; 0.43-0.63 m). El test MED de repelencia se llevó a cabo en muestras provenientes de un segundo muestreo ($n=140$) a una profundidad 0-0.03 m.

2.3. Propiedades fisico-químicas

Se utilizaron métodos estándar de medida de propiedades físico químicas (Dane y Topp, 2002). La textura se determinó con un densímetro de Bouyoucos, con hexametáfosfato como agente dispersante; la densidad aparente y porosidad por gravimetría en muestra inalterada. El pH se determinó tanto en agua como en NaF (Blakemore et al. 1981), y el contenido en materia orgánica mediante el método Walkey-Black. El contenido en lípidos por extracción con diclorometano/metanol (9:1 v/v). La retención de agua a -33 kPa (capacidad de campo) y -1500 kPa (punto de marchitez) se determinó con placas porosas de Richards en muestras tamizadas a 2 mm (Klute, 1986).

2.4. 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 placas Petri y se humedecieron desde humedad de campo hasta saturación. 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 12.5-100% (en pasos de 2.5%). 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 estadios finales (contenido de humedad, $\theta_g < 0.20$ 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. Además el método WDPT (Letey, 1969) se utilizó para caracterizar la persistencia en la repelencia de las muestras secas al aire del primer muestreo ($n=32$).

2.5. Técnicas estadísticas

La normalidad de los datos se caracterizó mediante gráficos de probabilidad con SYSTAT 10 (SPSS Inc., 2000) y gráficos Box-Cox de normalidad con Dataplot™ (Filliben et al. 1978). El número mínimo de muestras necesario para estimar la media de una población con una desviación estándar, σ , dentro de un rango $\pm d$ se calculó a partir de (Warrick y Nielsen, 1980):

$$n = Z_{0.05}^2 \sigma^2 / d^2 \quad (4)$$

siendo n el número de muestras; $Z_{0.05}$ es la diferencia con la media normalizada para un nivel de confianza 0.05, esto es $Z_{0.05}=1.96$.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del suelo

La textura USDA es franco-arcillosa (18.1% arcilla, 22.6% limo, 59.3% arena) y el pH es ácido (5.5 ± 0.4). La retención de humedad es alta tanto a capacidad de campo ($1.18 \pm 0.26 \text{ kg kg}^{-1}$) como en el punto de marchitez ($0.49 \pm 0.12 \text{ kg kg}^{-1}$), como es típico de suelos con origen volcánico. La densidad aparente es baja ($600 \pm 100 \text{ kg m}^{-3}$) debido a la elevada microporosidad y alto contenido en materia orgánica ($42.3 \pm 12.1\%$) del suelo. Tanto el contenido en materia orgánica como de lípidos disminuyó con la profundidad, al igual que el WDPT y el ángulo de contacto MED. Por debajo de los 0.23 m las muestras secas al aire se mostraron humectables. El pH_{NaF} es menor en los primeros centímetros del suelo, lo cual es consistente con el carácter órgano-mineral del perfil superior (Tabla 1).

Tabla 1. Repelencia y propiedades químicas del suelo estudiado.

Prof. (m)	MO (%)	WDPT (s)	α -MED (°)	Lípidos (mg g ⁻¹)	pH_{NaF}
0.00–0.03	41.9±12.5	944±1197	96.9±5.2	21.2±16.2	9.2±1.2
0.03–0.23	12.0±0.5	86±219	90.9±1.8	2.3	10.9±0.5
0.23–0.43	10.1±0.5	0	90	-	11.1±0.5
0.43–0.63	6.9±0.6	0	90	0.6	11.1±0.6

3.2. Descripción cualitativa de la curva de repelencia

La repelencia varió de forma no monotónica con el contenido de humedad del suelo (θ_g). En general las muestras se mostraron humectables a saturación. A partir de la humedad a capacidad de campo el ángulo de contacto aumentó hasta un máximo en las proximidades del punto de marchitez, para luego disminuir de forma monotónica,

aunque permaneciendo repelentes después del secado a 105°C . Por lo tanto la repelencia está presente en el rango de humedad relevante para las plantas. King (1981) observó igualmente un rápido aumento en la repelencia cuando hizo variar el contenido de humedad de un suelo seco al aire hasta cerca de la humedad residual, en donde ésta tomó valores máximos para luego disminuir rápidamente hasta hacerse nula a capacidad de campo. De Jonge et al. (1999) y Goebel et al. (2004) describen igualmente un comportamiento repelente no-lineal, sin embargo en su caso la mayoría de los suelos estudiados se mostraron humectables a contenidos de humedad muy bajos. Excepcionalmente, de las 140 muestras estudiadas sólo dos recobraron la humectabilidad a 105°C . El proceso de secado no intensificó el carácter hidrófobo de las muestras, como en el caso de de Jonge et al. (1999), donde los autores detectaron un segundo máximo de repelencia a humedades bajas debido a las altas temperaturas usadas para el secado. Para algunas muestras de suelo se observó un ligero aumento de la repelencia en las muestras secas a 105°C , frente al contenido de humedad previo a 60°C , pero esto no puede atribuirse a posibles efectos de temperatura dado que el mismo comportamiento fue descrito por de Jonge et al. (1999) en muestras secadas mediante congelación.

3.3. Descripción cuantitativa de la curva de repelencia

3.3.1. Caracterización de parámetros

La descripción de la curva de repelencia de un suelo mediante parámetros cuantitativos es poco frecuente (de Jonge et al. 1999). En nuestro caso hemos definido los siguientes parámetros que describen la curva θ_g -repelencia: las pendientes de ascenso (s^+) y descenso ($|s^-|$), el área debajo de la curva (S), el máximo ángulo de contacto medido (α_{max}), el contenido de humedad a α_{max} (θ_{g-max}), el ángulo de contacto de la muestra seca ($\alpha_{105^\circ \text{C}}$) o repelencia potencial (Dekker y Ritsema, 1994), el menor valor de θ_g al que α es prácticamente nulo (θ_{g-min}), la diferencia entre la repelencia máxima y la potencial, α_{err} (es decir, $\alpha_{err} = \alpha_{max} - \alpha_{105^\circ \text{C}}$), y la energía libre superficial en el suelo seco, $\gamma_{s-105^\circ \text{C}}$, y a repelencia máxima, γ_{s-max} .

3.3.2. Estadísticos

Las Tablas 2 y 3 resumen los principales estadísticos de los parámetros definidos arriba y del contenido en materia orgánica (MO).

La variabilidad es diferente para los distintos parámetros (Tabla 3). En general los parámetros de repelencia muestran una variabilidad pequeña comparada con otras propiedades hidráulicas del suelo como la conductividad hidráulica y eléctrica, las cuales presentan un coeficiente de variabilidad $\text{CV} > 100\%$ (ver Tabla 9.1 en Mulla y McBratney, 2002). Las pendientes s^+ y $|s^-|$ muestran una variabilidad relativamente alta ($\text{CV} > 50\%$), mientras que $\gamma_{s-105^\circ \text{C}}$, γ_{s-max} , θ_{g-max} , θ_{g-min} , α_{err} , S y MO muestran variabilidad moderada ($10 < \text{CV} < 30\%$); $\alpha_{105^\circ \text{C}}$, α_{max} resultan poco variables ($\text{CV} < 3\%$). Desde un punto de vista metodológico aquellos

parámetros con variabilidad baja son preferidos, dado que el número mínimo de medidas necesario para caracterizar la curva de repelencia es entonces menor. Nótese que la estimación de algunos de éstos parámetros dentro en un rango $d=5\%$, como es el caso de las pendientes de la curva, s^+ y $|s^-|$, requeriría un número prohibitivo de muestras, para poder estimar la media con un nivel de confianza del 95% (Tabla 3).

Tabla 2. Estadísticos y transformación normal (τ) de los parámetros de repelencia.

Parámetro	Media [†] ± DE	Rango	Transformación normal
$\alpha_{105^\circ\text{C}}$ (°)	103.68±2.86	90–110.91	-
$\gamma_{s-105^\circ\text{C}}$ (mN m ⁻¹) [‡]	10.43±1.43	7.37–17.82	Potencia ($\tau=-2$)
α_{max} (°)	115.17±2.12	108.36–118.43	-
γ_{s-max} (mN m ⁻¹) [‡]	5.91±0.70	4.89–8.36	Potencia ($\tau=-1$)
α_{err} (°)	11.49±3.51	2.48–24.23	Potencia ($\tau=0.5$)
θ_{g-max} (kg kg ⁻¹)	0.73±0.18	0.25–1.27	Normal ($\tau=1$)
θ_{g-min} (kg kg ⁻¹)	1.26±0.35	0.63–2.23	Normal ($\tau=1$)
s^+ (°kg kg ⁻¹)	15.56±8.53	2.06–61.66	Logarítmica ($\tau=0$)
$ s^- $ (°kg kg ⁻¹)	47.01±26.05	17.34–187.46	Logarítmica ($\tau=0$)
MO (%)	42.31±12.14	7.99–80.61	Normal ($\tau=1$)
S (°kg kg ⁻¹)	140.24±37.01	66.28–234.91	Normal ($\tau=1$)

[†] Media geométrica para transformación logarítmica y aritmética en los demás casos. [‡] γ_s a partir de ec. (3), asumiendo $\Theta=1$.

Tabla 3. Mínimo número de medidas necesario para estimar la media de los parámetros de repelencia (media±d) para un 95% probabilidad.

Parámetro	CV (%)	d=5%	d=10%	d=20%
$\alpha_{105^\circ\text{C}}$ (°)	2.76	1	-	-
$\gamma_{s-105^\circ\text{C}}$ (mN m ⁻¹) [‡]	13.71	29	7	2
α_{max} (°)	1.84	1	-	-
γ_{s-max} (mN m ⁻¹) [‡]	11.86	22	5	1
α_{err} (°)	30.57	144	36	9
θ_{g-max} (kg kg ⁻¹)	25.18	97	24	6
θ_{g-min} (kg kg ⁻¹)	27.56	117	29	7
s^+ (°kg kg ⁻¹)	54.83	462	115	29
$ s^- $ (°kg kg ⁻¹)	55.41	472	118	29
MO (%)	28.70	127	32	8
S (°kg kg ⁻¹)	26.39	107	27	7

3.3.3. Normalidad

La aplicación de muchas técnicas estadísticas asume normalidad de los datos, por lo que la normalidad de los parámetros de repelencia arriba definidos es una propiedad que debe ser investigada. Mediante gráficos de probabilidad y Box-Cox de normalidad se determinó la transformación τ óptima que normaliza los datos (Tabla 2). Algunos de los parámetros de repelencia siguen una distribución Gaussiana (θ_{g-max} , θ_{g-min} , MO y S); la normalidad de s^+ y $|s^-|$ mejora tras aplicar una transformación logarítmica, mientras que α_{err} es normalizado tomando la raíz cuadrada. Hallet et al. (2004) encontraron que definida la repelencia de un suelo como sortividad de etanol, S_E , frente a la sortividad del agua, S_w , ésta última seguía una distribución log-normal, mientras que es la raíz de S_E la que se distribuye de forma Gaussiana. Los gráficos de probabilidad de $\alpha_{105^\circ\text{C}}$ y α_{max} mostraron agrupamiento en clases, más evidente en el

primero. Igualmente ocurrió con $\gamma_{s-105^\circ\text{C}}$ y γ_{s-max} (resultados no mostrados). Esta puede resultar una propiedad deseable si la repelencia de un suelo se caracteriza en términos de clases hidrófobas (Letey, 1969; King, 1981). En caso contrario, una forma de evitar este agrupamiento es utilizar α_{err} , que es una combinación lineal de ambos parámetros $\alpha_{105^\circ\text{C}}$ y α_{max} , y que no muestra agrupamiento. Por otro lado, $\alpha_{105^\circ\text{C}}$ y α_{max} no mejoraron el sesgo bajo ninguna de las transformaciones aplicadas. Una forma de rodear este problema es utilizar $\gamma_{s-105^\circ\text{C}}$ y γ_{s-max} los cuales están relacionados con α a través de las Ec(s). (2 y (3). La distribución estadística seguida por los distintos parámetros puede darnos una idea acerca del origen y génesis de los mismos. Un principio en ocasiones referido es que las propiedades dinámicas o relacionadas con un flujo se distribuyen aproximadamente de forma log-normal mientras que las propiedades estáticas del suelo son Gaussianas (Hopmans y Overmars, 1986; Horowitz y Hillel, 1987). Esto está en concordancia con la distribución seguida por las pendientes de la curva de repelencia, s^+ y $|s^-|$, ya que en cierto sentido éstas se refieren a una propiedad dinámica como es la velocidad de cambio de la repelencia de la muestra.

3.3.4. Localización del máximo y mínimo de repelencia

La dependencia de la humectabilidad de un suelo con el contenido de humedad, puede explicarse mediante la combinación de dos procesos (Goebel et al. 2004). A bajos contenidos de humedad del suelo (régimen de secado en estufa) la adsorción de agua está controlada por la baja energía libre de las partículas provocada por la envuelta orgánica de las mismas. De hecho en nuestro caso la energía libre superficial de las partículas sólidas del suelo a 105 °C, $\gamma_{s-105^\circ\text{C}}$, viene dada por la Ec. (3), y resulta en un valor medio de $\gamma_{s-105^\circ\text{C}} = 10.4/\Theta^2$ mN m⁻¹ (esto es $\gamma_{s-105^\circ\text{C}}$ varía desde 41.6 a 7.9 mN m⁻¹ para Θ entre 0.5 y 1.15). Este valor tan pequeño de energía libre de la fracción sólido-orgánica del suelo resulta en una atracción débil entre la fase sólida y líquida, y consecuentemente en repelencia. A medida que aumenta el contenido de humedad del suelo el número de monocapas de agua se ve incrementado y esto afecta a la energía libre del suelo, y consecuentemente a su comportamiento hidrófobo. La siguiente relación se encontró entre la cantidad de agua adsorbida al suelo θ_{bw} y θ_{g-max} ($R^2=0.658$):

$$\theta_{g-max} = 5.646\theta_{bw} - 0.430 \quad (5)$$

Por lo tanto y dado que la pendiente de la Ec. (5) es distinta de la unidad, podemos concluir que el recubrimiento orgánico de las partículas de suelo tiene un efecto más allá del espesor de tres capas de agua (considerada como agua unida o adsorbida). La existencia de fuerzas de largo alcance ha sido demostrada con anterioridad mediante birrefringencia y medición de propiedades dieléctricas (Derjaguin y Churaev, 1986).

Además se encontró la siguiente relación entre θ_{g-max} y el punto de marchitez, θ_{wp} , ($R^2=0.715$):

$$\theta_{g-max} = 2.317\theta_{wp} - 0.276 \quad (6)$$

La humectabilidad de las muestras se recuperó en el punto a capacidad de campo como demuestra la siguiente ecuación en la que la línea θ_{g-min} frente a θ_{fc} que se aproxima a la bisectriz 1:1, ($R^2=0.720$):

$$\theta_{g-min} = 0.962\theta_{fc} + 0.107 \quad (7)$$

3.3.5. Correlación de parámetros

Dada la necesidad de una caracterización multi-paramétrica de la curva de repelencia, y debido a la distinta variabilidad presentada por los parámetros propuestos, se exploró las posibles correlaciones entre éstos. Esto permite diseñar una estrategia óptima para caracterizar la curva $\alpha-\theta_g$ en suelos hidrófobos. La Tabla 4 presenta la matriz de correlación de los parámetros de repelencia y el contenido en materia orgánica. Las correlaciones más significativas ($R^2 \geq 0.5$) se presentan en negrita. Concretamente, S está correlacionada con la mayoría de los parámetros. En particular con θ_{g-max} , θ_{g-min} , s^+ , $|s^-|$ y MO (Fig. 1 y Tabla 4).

Tabla 4. Matriz de coeficientes de correlación, R2, para los parámetros de repelencia.

	$\gamma_{s-105^\circ C}$	α_{err}	θ_{g-max}	θ_{g-min}	s^+	$ s^- $	MO	S
$\gamma_{s-105^\circ C}$	0.004	0.609	0.122	0.311	0.514	0.202	0.297	0.334
γ_{s-max}		0.328	0.038	0.121	0.112	0.121	0.113	0.090
α_{err}			0.172	0.466	0.654	0.332	0.448	0.458
θ_{g-max}				0.533	0.598	0.080	0.347	0.544
θ_{g-min}					0.624	0.589	0.595	0.997
s^+						0.239	0.508	0.667
$ s^- $							0.325	0.706
MO								0.597

De Jonge et al. (1999) también encontraron una buena correlación entre S y MO . Es de destacar el ajuste casi perfecto entre S y θ_{g-min} ($R^2=0.997$). Esta relación $S=S(\theta_{g-min})$ es de esperar dada la forma de la siguiente expresión analítica aproximada obtenida mediante triangulación:

$$S^* = \frac{\alpha_{max}}{2} \theta_{g-min} + \frac{\alpha_{105^\circ C} \alpha_{err}}{2s^+} \quad (8)$$

Desde un punto de vista conceptual, S resulta un parámetro adecuado dado que integra la dependencia de la repelencia con la humedad. Sin embargo para su estimación se hace necesario caracterizar la curva $\alpha-\theta_g$ completa, lo

que supone un importante esfuerzo experimental. Las correlaciones propuestas pueden resultar útiles en este sentido, dado que proporcionan una forma de extrapolar S a partir de medidas puntuales de θ_{g-max} , θ_{g-min} o MO .

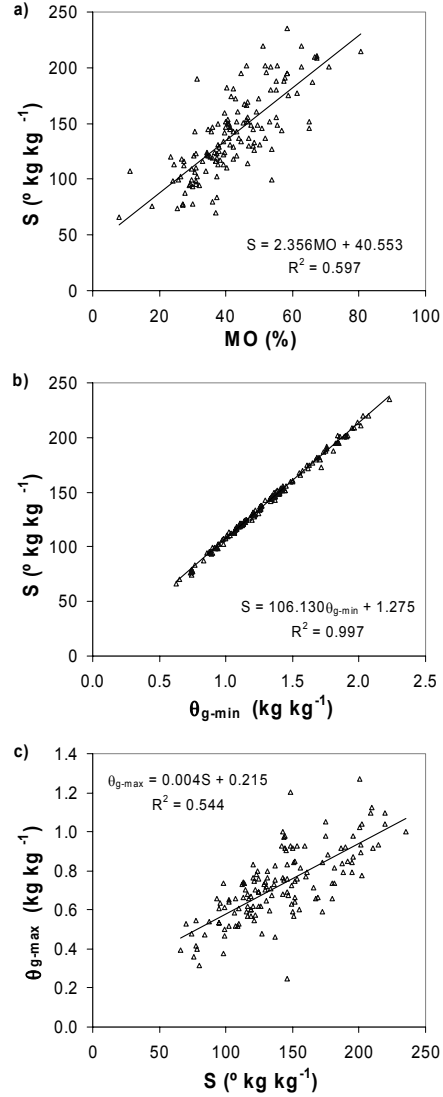


Fig. 1. Correlación del área debajo de la curva de repelencia, S , con el contenido en materia orgánica (a) y otros parámetros de repelencia: θ_{g-min} (b) y θ_{g-max} (c).

3.3.6. Estrategia para la caracterización de la repelencia

Como resumen se propone la siguiente estrategia para caracterizar las propiedades hidrófobas del suelo investigado (Fig. 2), que de confirmarse en otros suelos puede suponer un método generalizado. S puede determinarse a partir del contenido en MO de la muestra (Fig. 1a) o θ_{g-min} (Fig. 1b).

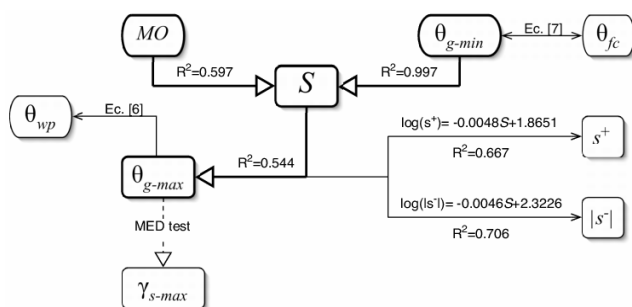


Fig. 2. Diagrama de flujo que resume la estrategia óptima para caracterizar la curva de repelencia con un número mínimo de parámetros.

Teniendo en cuenta que θ_{g-min} se encuentra cerca del valor de capacidad de campo (Ec. (7)), no resulta difícil dar una primera estimación del mismo a partir por ejemplo de valores de textura del suelo. Una vez se conoce S , puede predecirse el contenido de humedad al que la repelencia es máxima, θ_{g-max} ($R^2=0.544$). Finalmente una vez identificado θ_{g-max} , el valor de γ_{s-max} o α_{max} puede determinarse llevando a cabo una medida MED a ese contenido de humedad. Además a partir de S podemos estimar propiedades dinámicas de la repelencia como s^+ y $|s^-|$ (Fig. 2). La Tabla 3 puede servir para determinar el número mínimo de muestras en cada caso. La determinación directa de s^+ y $|s^-|$ requeriría una campaña intensiva de medición, no solo por su alta variabilidad ($CV = 54.83\%$ y 55.41% , respectivamente), sino que al menos son necesarias tres medidas de repelencia por muestra para poder estimar cada pendiente, por lo que la estrategia de extrapolación propuesta es una forma de rodear el problema. Finalmente el valor de repelencia de la muestra seca a 105°C nos proporciona tanto la repelencia potencial como una estimación de α_{err} .

4. Conclusiones

Se determinó la repelencia en el horizonte superficial de una cuenca forestal en el Parque Nacional de Garajonay con el test MED en pasos decrecientes de humedad edáfica. La repelencia varió de forma no lineal con el contenido de humedad del suelo, comportamiento que se caracterizó mediante distintos parámetros propuestos. Los resultados obtenidos destacan el área debajo de la curva de repelencia, S , como parámetro clave a determinar, por su valor integrador y su alta correlación con otros parámetros de repelencia. Se diseñó una estrategia óptima de medida y muestreo con tal fin. Siguiendo dicha estrategia, S puede estimarse a partir de θ_{g-min} con sólo 29 muestras. La curva de repelencia de un suelo y por tanto los parámetros que la caracterizan, son el resultado de algún proceso físico-químico, por lo que consideramos que la estrategia propuesta, los parámetros estudiados y las técnicas analíticas empleadas en este trabajo son extensibles a otros suelos.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado con fondos del INIA-Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias

(Proyectos RTA2005-228 y RTA01-097). Los autores quieren agradecer al Dr. R. Muñoz Carpena (Universidad de Florida) su participación en el desarrollo y puesta en marcha del proyecto RTA01-097. Igualmente los autores agradecen el apoyo prestado por el personal del Parque Nacional de Garajonay, y especialmente a L.A. Gómez y el director A. Fernández. El Dr. D.F.W. Naafs (Universidad de Utrecht) ha realizado la determinación de los lípidos del suelo.

Referencias

- Bauters, T.W.J., T.S. Steenhuis, D.A. DiCarlo, J.L. Nieber, L.W. Dekker, C.J. Ritsema, J.-I. Parlange y R. Haverkamp. 2000. Physics of water repellent soils. *J. Hydrol.* 231-232: 233-243.
- Bachmann, J., S.K. Woche, M.-O. Goebel, M.B. Kirkham y R. Horton. 2003. Extended methodology for determining wetting of porous media. *Water Resour. Res.* 39: 1353.
- Blakemore, L.C., P.L. Searle y B.K. Daly. 1981. Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 10A.
- 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.
- Dane, J.H. y G.C. Topp (eds.). 2002. *Methods of Soils Analysis, Part 4.* SSSA Book Series: 5. 1692 pp.
- 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.
- Dekker, L.W. y C.J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil 1. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.* 30: 2507-2517.
- Derjaguin, B.V. y N.V. Churaev. 1986. Properties of water layers adjacent to interfaces. p. 663-738. En Croxton, C.A. (ed.) *Fluid interfacial phenomena.* John Wiley & Sons, New York.
- 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., 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.
- 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.
- Filliben, J.J., A. Heckert y R.R. Lipman. 1978. NIST Dataplot™. HPPC/SIMA.
- 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.
- Hopmans J.W. y B. Overmars. 1986. Presentation and application of an analytical model to describe soil hydraulic properties. *J. Hydrol.* 87: 135-143.
- Horowitz, J. y D. Hillel. 1987. A theoretical approach to the areal distribution of soil surface conductivity. *Soil Sci.* 143: 231-240.
- Jaminson, 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, 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.
- 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.
- Klute, A. (ed.). 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 y critical surface tension. *Proc. Symp. Water Rep. Soils, Univ. Calif., Riverside.*
- Letey, J., J. Osborn y R.E. Pelishek. 1962. Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. *Soil Sci.* 93: 149-153.

- 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.
- Mulla, D.J. y A.B. McBratney. 2002. Soil spatial variability. pags. 343-373. En: Warrick, A.W. (ed.) *Soil physics companion*, CRC Press.
- Ritter, A. y C.M. Regalado. 1999. Balance hidrológico y simulación por ordenador del comportamiento de una cuenca tipo en el Parque Nacional de Garajonay. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA) (www.icia.es/gh/Garajonay/poster.html).
- 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.
- 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. pags. 15-27. En: Sala, M. y J.L. Rubio (eds.), *Soil erosion as a consequence of forest fires*. Geofoma Ediciones, Logroño.
- Tillman, R.W., D.R. Scotter, M.G. Wallis y B.E. Clothier. 1989. Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Aust. J. Soil Res.* 27: 637-644.
- 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.
- Warrick, A.W. y D.R. Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. pags. 319-344. En: Hillel, D. (ed.). *Applications of Soil Physics*. Academic Press. New York.