

REPELENCIA AL AGUA EN SUELOS: UNA SÍNTESIS

por

Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo¹

Resumen

Jaramillo Jaramillo, D.F.: Repelencia al agua en suelos: una síntesis. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **30** (115) 215-232. 2006. ISSN 0370-3908.

La repelencia al agua en el suelo, originada por la acumulación de compuestos orgánicos hidrofóbicos en él, reduce la infiltración y la disponibilidad de agua para las plantas; incrementa la escorrentía y la susceptibilidad a la erosión; puede deteriorar su estructura; genera grandes pérdidas en la producción agropecuaria y forestal y puede generar vías de flujo preferencial que facilitan el movimiento de agua y de contaminantes a través del mismo. Tiene una alta variabilidad y se expresa con mayor intensidad cuando el suelo está seco. Para manejar este problema se han estudiado alternativas como la mecanización del suelo durante o inmediatamente después de la lluvia, la mezcla del suelo repelente con arcilla y/o con materiales terrosos arcillosos del subsuelo, el encalamiento, la fertilización, la aplicación de riego para mantener húmedo el suelo y la adición de surfactantes.

Palabras clave: Hidrofobicidad de suelos, Suelos repelentes al agua, Suelos hidrofóbicos.

Abstract

Water-repellency of soil is generated by accumulation of hydrophobic organic compounds in the soil. This condition can destroy soil structure, reduce water infiltration and soil water availability for plants, increase runoff and soil erodability, and consequently generate high losses in crop, pasture and forest productivity. Similarly, water repellency of soil can create preferential flow pathways that favor movement of water and pollutants through soil profile. It has been observed that water-repellency exhibits a high variability and it is expressed more strongly when the soil has been dried. Many strategies have been tested for the management of water repellent soils that include: soil tillage during or immediately after a rain event, mixing water repellent soil with either clay and with clayey subsoil ("claying"), lime application, fertilization, irrigation to maintain soil moisture, and addition of wetting agents.

Key words: Soil hydrophobicity, Water-repellent soils, Hydrophobic soils.

¹ Profesor Titular. Escuela de Geociencias. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. A. A. 3840. Correo electrónico: djaramal@unalmed.edu.co

Introducción

Con este trabajo se pretende ilustrar a los lectores acerca del fenómeno de la repelencia al agua en los suelos, con el objetivo fundamental de motivarlos para que orienten algunos de sus esfuerzos académicos e investigativos al estudio de dicho problema.

La repelencia al agua: marco teórico

Un material sólido (incluyendo el suelo) se considera hidrofóbico o repelente al agua cuando entre la superficie del agua (interfase agua-aire) y la superficie del sólido (interfase agua-sólido) se forma un **ángulo de contacto** mayor o igual a 90° (Figura 1).

En el caso de los suelos, la mayoría de las veces la repelencia al agua no se manifiesta en forma permanente sino que se hace de forma estacional, siendo más intensa en las épocas secas, razón por la cual es frecuente hablar de “*suelos de difícil humectabilidad*” o de “*suelos resistentes a la humectación*” para referirse a los “suelos repelentes al agua”.

Desde un punto de vista práctico y sin que haya algún significado físico especial en ello, un suelo se considera repelente al agua si una gota de agua colocada sobre su superficie tarda más de 5 segundos en ser absorbida completamente (Richardson, citado por Dekker & Jungerius, 1990).

La **severidad** de la repelencia al agua es el grado de resistencia que opone el suelo al humedecimiento por el agua, durante un tiempo limitado de contacto entre las fases sólida y líquida (Roy & McGill, 2002). Doerr *et al.*

(2000) la definen con la pregunta “¿qué tan fuertemente es repelida el agua por el suelo?”.

Watson & Letey (1970) observaron, al colocar una gota de agua sobre la superficie de un suelo repelente a ella, que la misma permanecía sobre dicha superficie un tiempo, cuya duración dependía de la tensión superficial inicial del líquido y, con base en esta observación, consideraron que ese tiempo era una medida, no de la repelencia al líquido en sí, sino del tiempo que era necesario para que el ángulo de contacto inicial ($> 90^\circ$) se redujera hasta un valor de 90° o menos y así el líquido pudiera ser absorbido por el sólido; ese tiempo lo definieron como la **persistencia** de la repelencia al agua del suelo, es decir, que era una medida de la “estabilidad de la repelencia”.

Origen de la repelencia al agua en los suelos

La repelencia al agua en el suelo se debe a la acumulación de ciertos tipos de compuestos orgánicos hidrofóbicos en él, los cuales no presentan un grado de alteración muy avanzado, es decir, no corresponden con humus propiamente dicho. Estos compuestos pueden producirse por el metabolismo y/o la descomposición de organismos, principalmente vegetales y microbiales (Doerr *et al.*, 2000), por someter el suelo a incendios, quemas y calentamiento o secado (DeBano, 1981, 2000; Dekker & Ritsema, 2000) o por contaminar el suelo con petróleo y/o con sus derivados (Roy & McGill, 1998).

Doerr *et al.* (2000) reúnen los compuestos responsables de la repelencia al agua en el suelo en dos grandes grupos:

- El primero, compuesto por **hidrocarburos alifáticos** que son sustancias formadas por hidrógeno y carbono, con los carbonos distribuidos en cadenas largas. Estos compuestos son no polares y, en consecuencia, son casi insolubles en agua.
- El segundo grupo está formado por compuestos de estructura **anfifílica**, es decir que son compuestos que tienen una parte terminal polar y otra no polar. La parte terminal polar es hidrofílica, en tanto que la no polar es hidrofóbica.

La vegetación

Las plantas hacen el mayor aporte de sustancias que pueden generar repelencia al agua en el suelo. Prácticamente todos sus órganos contienen compuestos hidrofóbicos que pasan al suelo, ya sea porque la descomposición los libera cuando la planta o alguno de sus órganos mueren, o porque son aportados mediante lavado de las superficies vegetales vivas o porque fluyan hacia el suelo en forma de exudados.

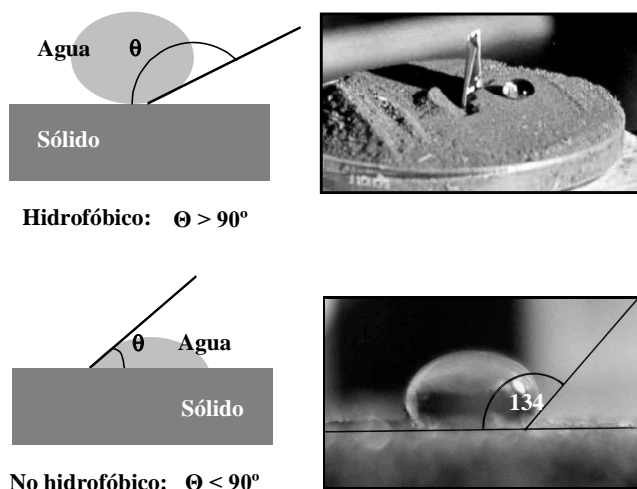


Figura 1. Ángulo de contacto entre un sólido repelente y no repelente al agua y en suelo repelente al agua.

De las revisiones hechas por **DeBano** (1981), **Wallis & Horne** (1992) y **Doerr et al.** (2000) se destacan los siguientes géneros y especies por ser mencionados con mayor frecuencia en la literatura (el orden en que se presentan no implica mayor o menor efecto sobre la repelencia al agua en el suelo):

- **Árboles:** *Acacia, Acer, Banksia, Carya, Citrus, Cupressus, Eucalyptus, Juniperus, Larix, Picea, Pinus, Populus, Pseudotsuga, Quercus, Tsuga.*
- **Rastrojos:** *Adenostema, Arctostaphylus, Calluna, Cercidium, Chamaespartium, Chrysotamnus, Chusquea, Cistus, Erica, Larrea, Prosopis, Pteridium, Vaccinium, Ulex.*
- **Cereales cultivados:** *Hordeum vulgare, Triticum aestivum.*
- **Leguminosas:** *Lupinus cosentinii, Medicago sativa, Trifolium subterraneum.*
- **Pastos:** *Agrostis, Erharta, Phalaris, Phragmites, Spinifex.*

Los microorganismos

Según información recopilada por **Jaramillo** (2004), los microorganismos que pueden producir repelencia al agua en el suelo son más de 60 especies de Basidiomicetes, siendo señalados con mayor frecuencia *Amanita muscaria, Amanita vaginata, Aspergillus sydowi, Cortinarius sp, Fusarium sp, Lactarius deliciosus, Marasmius oreades, Penicillium nigricans, Piloderma bicolor, Rhizopogon vinicolor, Russula sp* y *Trichoderma sp.*

Incendios, quemas y secado del suelo

Otro agente que puede generar repelencia al agua en el suelo es el fuego. **DeBano** (1981, 2000) ha destacado los siguientes resultados:

- La intensidad del fuego, la cantidad de materia orgánica fresca (hojarasca) acumulada sobre la superficie del suelo y la acumulación de productos de la descomposición y del metabolismo de los organismos que viven en él, determinan el efecto que va a tener el fuego sobre la repelencia al agua del suelo.
- El calor producido por la combustión de la capa de hojarasca puede alcanzar entre 850 y 1100°C y vaporizar sustancias orgánicas que son movidas hacia el interior del suelo siguiendo un gradiente de tempera-

tura, hasta que llegan a capas interiores más frías que hacen que se condensen en ellas, generándose la hidrofobicidad en ellas.

- Después de un incendio la repelencia al agua puede manifestarse como una capa discreta, de espesor y continuidad variables, en la superficie del suelo o a unos pocos centímetros de profundidad y paralela a su superficie.
- Con respecto a la relación entre la temperatura y la repelencia al agua en el suelo, se producen cambios muy pequeños cuando el calentamiento se hace a menos de 175°C; se produce una intensa repelencia cuando este se hace entre 175 y 200°C; con temperaturas entre 280 y 400°C ocurre la destrucción de casi todos los compuestos hidrofóbicos.

No sólo las temperaturas alcanzadas durante un incendio son capaces de alterar el comportamiento hídrico del suelo. **Jaramillo** (2003) mostró que el secado de las muestras de Andisoles incrementaba la repelencia al agua del suelo así como el espesor de éste afectado por ella, al incrementar la temperatura de secado desde la condición de campo (aproximadamente 15°C) hasta temperaturas de 35 y de 105°C. En la Figura 2 puede verse que el suelo estudiado no presentó repelencia al agua en condiciones de campo (WDPT c)² en ningún punto y en ninguna profundidad; sin embargo, cuando fue sometido a secado en laboratorio a 35°C (WDPT 35), se presentó algún grado de repelencia al agua en todos los sitios estudiados y cuando las muestras se secaron a 105°C (WDPT 105), todo el perfil del suelo estudiado en 4 profundidades (casi 30 cm), fue extremadamente repelente al agua. Efectos similares encontró **Vanegas** (2003) al secar Andisoles a temperaturas de 15, 20, 25, 30, 35 y 105°C.

Contaminación con petróleo

Roy et al. (2000) estudiaron 27 sitios que habían tenido derrames de petróleo crudo durante 20 a 50 años, en Alberta, Canadá y encontraron que en cada uno de los sitios se presentaron entre 1 y 8 parches hidrofóbicos que variaron de tamaño entre 0.03 y 6.4 ha, con un tamaño promedio de 0.38 ha. El grado de repelencia al agua fue evaluado mediante el MED³ en muestras superficiales tamizadas a 1 mm, encontrando 20 muestras severamente repelentes al agua (MED > 2.2. M) y 7 con MED = 2.2 M. En dos sitios se presentó un MED > 5 M.

2 **WDPT:** Abreviatura de **Water Drop Penetration Time**, es decir, tiempo de penetración de una gota de agua en el suelo; es la manera de evaluar la persistencia de la repelencia al agua en el suelo. Ver página 227.

3 **MED:** Abreviatura de **Molarity Ethanol Drop**, es decir, molaridad de la gota de una solución de etanol que entra al suelo en 5 segundos o menos. Ver página 227.

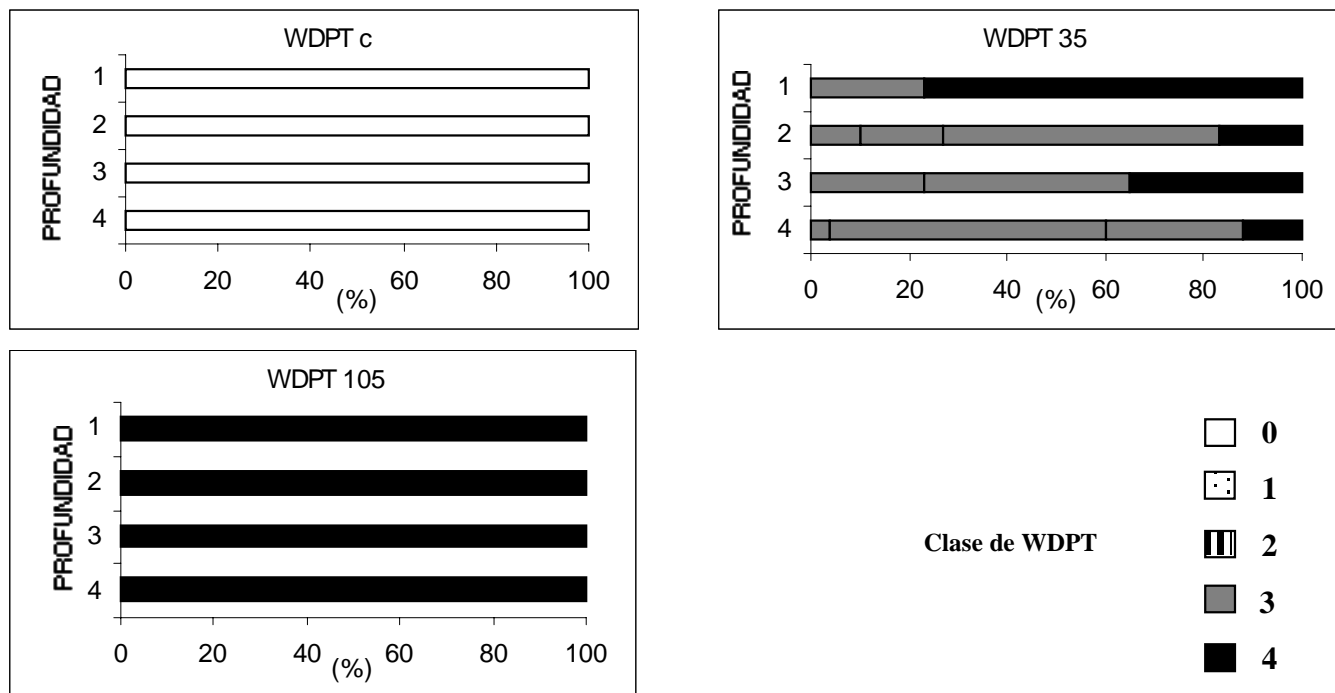


Figura 2. Efecto del secado sobre la repelencia al agua de Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) bajo cobertura de *Pinus patula*. Para las clases de WDPT ver Tabla 5. (Con base en datos de Jaramillo, 2003).

A pesar de que los compuestos hidrofóbicos que causan la repelencia al agua son de naturaleza orgánica, en muy pocos trabajos se ha podido relacionar el grado de repelencia al agua del suelo con su contenido de materia orgánica y, en la mayoría de ellos, las relaciones significativas establecidas han presentado coeficientes de determinación bajos y poco satisfactorios para hacer predicciones acerca de la eventual manifestación del fenómeno en un suelo dado, con un determinado contenido de materia orgánica. Este comportamiento ha llevado a concluir que “no es la cantidad sino el tipo de materia orgánica del suelo, lo que hace que se manifieste la repelencia al agua en él”.

Luego de que se producen los compuestos hidrofóbicos, éstos se distribuyen en el suelo para imprimirle ese carácter de repelencia. En la distribución, los compuestos van recubriendo total o parcialmente granos, agregados y/o paredes de los poros, transmitiéndole al material afectado su comportamiento hidrofóbico.

Ocurrencia de la repelencia al agua en el suelo

La repelencia al agua es un fenómeno documentado ampliamente en gran cantidad de países. DeBano (1981) cita trabajos en los que se ha estudiado sistemáticamente en Estados Unidos, Australia, Canadá, Egipto, Holanda,

India, Japón, Rusia y Nueva Zelanda. Otros investigadores, citados por Jaramillo (2004), registran estudios hechos en Alemania, Brasil, Chile, China, Colombia, Ecuador, España, Grecia, Italia, Malí, Polonia, Portugal, Reino Unido, Suiza, Sudáfrica y Turquía.

Aunque es difícil establecer la distribución y la cobertura de la repelencia, en algunas regiones se ha observado que afecta áreas extensas ocasionando problemas graves en la producción agropecuaria. House, citado por Doerr *et al.* (2000), estima que en Australia se encuentran afectadas por el fenómeno de repelencia al agua 5 millones de hectáreas, en las cuales se genera hasta un 80% de pérdidas en la producción agrícola. Blake (2002) señaló que en suelos del oeste de Australia había caídas en la producción de cereales de 5 t ha⁻¹ a menos de 0.5 t ha⁻¹, por efecto de la repelencia.

Dekker & Ritsema (1994) encontraron que el 75% de los horizontes superficiales de los suelos de las tierras agrícolas y ganaderas de Holanda presentan algún grado de repelencia al agua y que más del 95% de los mismos horizontes, en suelos de reservas naturales, son de fuerte a extremadamente repelentes al agua.

Se reconoce que la repelencia al agua es un fenómeno de superficie específica y, sin duda, lo es en ambientes donde la acumulación de materia orgánica es baja, debi-

do a la alta rata de mineralización que se produce en los suelos. Posiblemente ésto explique la presencia de hidrofobicidad extrema reconocida en amplias zonas secas y con suelos arenosos de Australia.

Sin embargo se ha comprobado que la textura arenosa no es la única susceptible de asimilar la hidrofobicidad. Otra situación que puede restarle importancia al fenómeno de superficie específica es que las partículas o los agregados no tienen que estar recubiertos completamente con sustancias hidrofóbicas para que el suelo, en su conjunto, se manifieste como tal (Bisdorn *et al.*, 1993; Dekker, 1998; Doerr *et al.*, 2000).

Scott (2000) no encontró un efecto significativo de la textura sobre su grado de repelencia en un muestreo hecho en 10 localidades de Sudáfrica bajo plantaciones forestales de eucaliptos y pinos; las clases texturales variaron de arenoso franco a arcillo limoso. Roy *et al.* (2000) concluyeron que el desarrollo de repelencia al agua en los suelos no estuvo restringido a ninguna clase textural en particular, puesto que encontraron muestras hidrofóbicas en las 10 clases texturales de los 27 sitios analizados y no tuvieron muestras arcillosas ni limosas.

Aunque la repelencia ha sido ampliamente observada en condiciones de climas secos y suelos arenosos, éstas no son las únicas condiciones en las que se produce. Se ha registrado también en climas húmedos tropicales (Jaramillo, 1992; Pérez *et al.*, 1998; Jaramillo *et al.*, 2000), en clima húmedo mediterráneo (Doerr & Thomas, 2000) y en otros climas húmedos del norte de Europa (Doerr *et al.*, 2000). En la literatura hay registros de repelencia en una gran variedad de suelos, desde minerales hasta orgánicos, incipientes a muy evolucionados, fuertemente ácidos a alcalinos, fértiles a poco fértiles, lo que da pie para pensar que la *hidrofobicidad puede presentarse en cualquier tipo de suelo*.

La hidrofobicidad se ubica, en el caso más común, en su superficie. Cuando el suelo posee una capa de hojarasca, con mayor frecuencia se ubica en el contacto entre los dos materiales, afectando la parte mineral del mismo, aunque la hojarasca también puede presentarse hidrofóbica (Jaramillo, 2003, 2005) (ver Figura 3). Cuando el suelo ha sido sometido a quemas o a incendios fuertes, se puede generar una capa hidrofóbica subsuperficial. Una forma frecuente de repelencia al agua en el suelo es a manera de parches, áreas de suelo hidrofóbico que alternan con cuerpos de suelo humectable, como puede verse en la figura 4.

Un aspecto fundamental al estudiar la repelencia al agua es que muestra una alta variabilidad, tanto aleatoria, como temporal y espacial. El fenómeno no se manifiesta de manera permanente: se presenta con máxima intensi-



Figura 3. Ubicación de una capa de suelo repelente al agua (de color claro por estar seca) en un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), inmediatamente debajo de la capa de acículas de *Pinus patula* acumulada sobre su superficie (Tomada de Jaramillo, 1992).

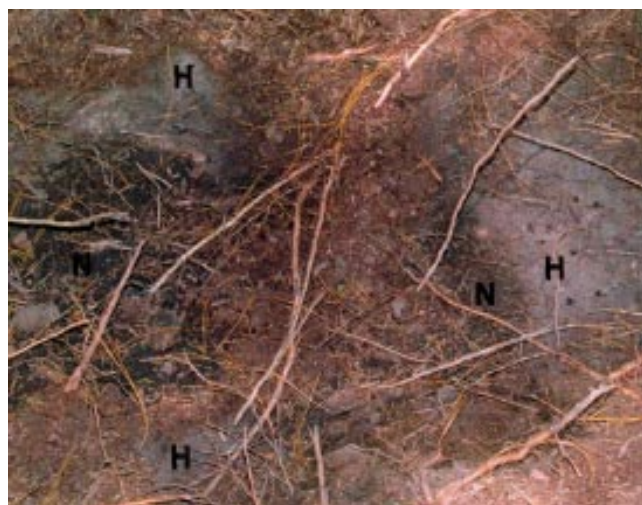


Figura 4. Parches de suelo repelente al agua (H) de color claro, alternando con suelo humectable normalmente (N) de color oscuro, en Andisoles de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), bajo cobertura de *Pinus patula* (Tomada de Jaramillo, 1992).

dad en las épocas más secas y disminuye, llegando inclusive a desaparecer, en las épocas húmedas. Períodos prolongados de sequía generan alta intensidad en la hidrofobicidad y una alta dificultad para humedecer nuevamente el suelo, pudiéndose necesitar períodos largos de humedecimiento para restablecer su humectabilidad. Este comportamiento ocasiona retraso en el diagnóstico de la repelencia, simplemente porque con mayor frecuencia los suelos se observaron estando húmedos y pocas veces después de una sequía prolongada.

Además de la alta variabilidad estacional que presenta la repelencia se ha establecido que también posee una alta variabilidad espacial, predominantemente de rango corto (Dekker, 1998; Ritsema, 1998, Jaramillo, 2003, 2004; Vanegas, 2003; Caballero, 2005).

Efectos de la repelencia al agua en el suelo

La presencia de materiales repelentes al agua imprime al suelo una serie de comportamientos particulares, sobre todo con su hidrología y con la susceptibilidad a la erosión.

Contenido de humedad

El hecho de que un suelo manifieste algún grado de repelencia al agua no quiere decir que deba estar completamente seco. En la Tabla 1 se aprecia que el contenido de humedad en muestras con algún grado de repelencia puede ser bastante alto, después de ser sometidas a secado a 35°C. No existe relación directa entre la repelencia al agua y el contenido de humedad de las muestras; las menos repelentes no son las que conservan mayor cantidad de humedad.

Doerr *et al.* (2000) registra varios trabajos en los que se obtuvieron altos valores de humedad almacenada en suelos repelentes al agua y recopila algunas propuestas en relación con los mecanismos que podrían explicar esa situación:

- El movimiento de agua en forma de vapor se produce libremente en el suelo y puede ayudar a redistribuir la humedad en el interior del mismo, acumulando humedad en los suelos hidrofóbicos.
- La presencia de materiales finos hidrofílicos embebidos en el espacio poroso de una matriz de suelo hidrofóbica puede permitir el humedecimiento parcial del suelo, a la vez que dichos materiales pueden actuar como núcleos de condensación de vapor de agua.
- Algunas partículas hidrofóbicas pueden sufrir transformaciones durante el proceso de adsorción de vapor, permitiendo la entrada de agua al suelo.

Dekker & Ritsema (1994, 1995) observaron en varios tipos de suelos de Holanda que, a pesar de presentar repelencia conservaban contenidos importantes de humedad, teniendo en cuenta las texturas y sus contenidos de materia orgánica. Los contenidos de humedad tenían una alta variabilidad espacial, tanto superficial como en profundidad, así como una apreciable variabilidad estacional. Pese a la alta variabilidad, observaron que había un “*contenido crítico de humedad*” para que se presentara repelencia al agua, el cual definieron como el “contenido de humedad que presenta el suelo, por debajo del cual se manifiesta repelente al agua y por encima del cual es humectable”. La humedad crítica es más variable, estacionalmente, en los primeros centímetros del suelo, probablemente debido al mayor contenido de materia orgánica.

Dekker & Ritsema (2000) en suelos de Holanda encontraron valores críticos de humedad volumétrica desde 2%, entre 35 y 40 cm de profundidad en un Psammaquent, hasta de 25%, entre 10 y 15 cm de profundidad en un Fluvaquent franco limoso, con una alta variabilidad tanto horizontal como vertical.

Doerr & Thomas (2000), en suelos de Portugal (Umbric Leptosols superficiales y Humic Cambisols), con texturas

Tabla 1. Contenido de humedad gravimétrico (%) de muestras de Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), bajo cobertura de *Pinus patula*, con diferente grado de repelencia al agua, sin secar y secadas a 35°C.

Clase de WDPT*	Muestras sin secar (n = 804)			Muestras secadas a 35°C (n = 811)		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
0	216.36	771.98	64.05	19.58	63.84	8.17
1	300.47	568.30	198.87	26.01	64.87	10.50
2	226.04	300.11	87.84	21.54	65.87	10.72
3	-	-	-	20.63	92.80	7.53
4	-	-	-	21.23	67.35	7.76
General	221.72	771.98	64.05	21.13	92.80	7.53

* Clases según Dekker & Jungerius (1990). Ver Tabla 5.

franco arenosas y arenoso francas, con menos de 6% de arcilla y en clima húmedo mediterráneo, encontraron un límite crítico de humedad gravimétrica de 28%, aunque señalaron que no existía relación clara entre el incremento de la hidrofobicidad y la disminución de la humedad.

Dekker et al. (2001) revisaron el concepto de “contenido crítico de humedad del suelo” propuesto por **Dekker & Ritsema** (1994) y concluyeron que no es adecuado plantear ese contenido de humedad con un valor único, como un límite tajante, por encima del cual el suelo es humectable y, por debajo, es repelente al agua, sino que es más conveniente y refleja mejor la relación humedad-repelenencia, si se define un rango de humedad crítico que cumpla esa función de clasificación de la humectabilidad; a este rango le dieron el nombre de “zona de transición del contenido de humedad crítico del suelo”. Las muestras pueden ser humectables o repelentes al agua, dentro de la zona de transición. Los límites de la zona de transición son determinados por el contenido mínimo de humedad que se obtiene en la clase 0 de WDPT y el contenido máximo de humedad que se obtiene en cualquier otra clase de WDPT, diferente a la clase 0 (ver Tabla 5).

Dekker et al. (2001) evaluaron el contenido de humedad crítico en suelos arenosos de dunas de Holanda, haciendo ocho muestreos en perfil, en diferentes épocas y en seis profundidades. Determinaron la persistencia de la **repelenencia real** (en el suelo con la humedad de campo) y la de la **repelenencia potencial** (en suelos secados en laboratorio a diferentes temperaturas) a 25°C y a 65°C con el método del WDPT. A cada una de las muestras, en las diferentes condiciones experimentales, se les determinó el contenido de humedad. Encontraron que, en los primeros 20 cm la zona de transición tuvo, como límite inferior de humedad volumétrica, contenidos entre 18% en la superficie y 2% a 19 cm de profundidad, mientras que el límite superior, para las mismas profundidades, fue de 23% y de 5% de humedad.

Jaramillo (2003) trató, infructuosamente, de definir el límite crítico de humedad para los Andisoles en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), con una base de 811 muestras bajo cobertura de *Pinus patula*. En trabajos posteriores, **Jaramillo** (2005), también en Andisoles con cobertura de *Pinus patula* y **Caballero** (2005), en Andisoles con cobertura de *Pinus patula*, *Cupressus lusitanica* y *Quercus humboldtii*, tampoco pudieron definir ni valores ni zonas de transición de contenidos de humedad críticos. En la Figura 5 se observa que no hay relación entre la humedad del suelo y su repelenencia al agua, en 128 muestras superficiales de Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), ni en condiciones de humedad de campo (repelenencia real), ni cuando fueron secadas a 35°C (repelenencia potencial).

La infiltración y el humedecimiento del suelo

En un suelo humectable y seco, el proceso de humedecimiento inicial es rápido debido a las altas fuerzas de atracción que se generan entre los sólidos del suelo y el agua; sin embargo, este proceso puede llegar a ser extremadamente lento en suelos que, estando secos, presentan materiales repelentes al agua.

En términos de infiltración, la rata de entrada del agua a un suelo humectable y seco, inicialmente es alta pero al poco tiempo empieza a decrecer; por el contrario, en un suelo repelente al agua, la rata de infiltración, al iniciar el proceso de humedecimiento, es supremamente lenta e inclusive puede ser nula; el agua empezará a penetrar en el suelo al cabo de un tiempo de contacto; al aumentar el tiempo, la rata de infiltración también aumenta.

Wilkinson & Miller (1978) evaluaron la rata de infiltración en parches con suelo repelente al agua y en suelo normal en un campo de golf y encontraron que en los parches hidrofóbicos dicha tasa fue sólo el 20% de la tasa observada en el suelo normal adyacente.

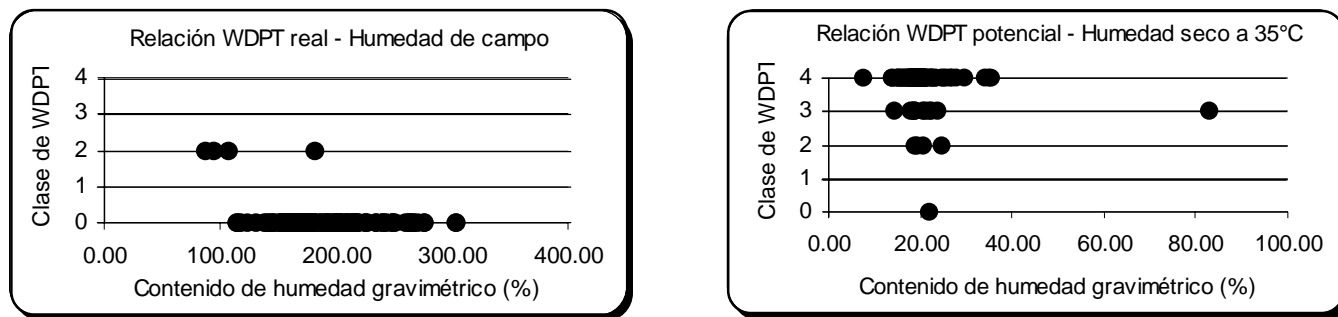


Figura 5. Relación de la repelenencia al agua, real y potencial a 35 °C, y de la humedad correspondiente, en Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) bajo cobertura de *Pinus patula*.

Moral et al. (2003) estudiaron problemas hidrológicos en varios suelos arenosos con repelencia al agua en el Parque Natural de Doñana, al sur de la península Ibérica. Hicieron ensayos de infiltración en campo y en laboratorio con ayuda de infiltrómetros de succión, con tiempo límite de duración para la prueba de 20 minutos, dada la textura gruesa que presentaban los suelos. Utilizaron agua y etanol para hacer las pruebas de infiltración. En la figura 6 se observan algunos de los resultados obtenidos. Puede verse que en el suelo humectable (Figura 6a), con agua y con etanol se obtienen prácticamente las mismas curvas de infiltración para el tiempo de observación utilizado; en cambio, cuando los suelos fueron repelentes al agua (Figura 6b), hubo una marcada diferencia entre las curvas conseguidas con etanol y con agua.

Nótese en la Figura 6b que con etanol las curvas presentan un comportamiento similar al del agua en el suelo no repelente; rápidamente empieza a mostrar la tendencia a volverse asintótica y a estabilizarse; en cambio, con agua, terminado el tiempo de la prueba, la curva de infiltración todavía está en su fase ascendente y muy lejos del tope que está poniendo la curva del etanol. Téngase en cuenta que el etanol no se ve afectado por la presencia de repelencia al agua en el suelo.

DeBano (1971) estudió el efecto de la repelencia sobre el avance del frente de humedecimiento en columnas de suelo de textura gruesa, colocadas horizontalmente;

encontró que dicho frente se movió 25 veces más rápido en la columna que contenía suelo humectable que en la que tenía el suelo repelente al agua. Además, observó que la diferencia en el contenido de humedad entre el punto de contacto del suelo con la fuente de agua y el frente de humedecimiento varió entre 20 y 25%, en el suelo repelente, mientras que en el humectable sólo varió alrededor del 10%, aparte de que el suelo repelente al agua presentó un frente de humedecimiento muy mal definido; el agua no mojó este suelo en forma homogénea.

Wallis et al. (1990a) también encontraron grandes diferencias entre la rata de infiltración mostrada por dos sitios con suelos arenosos con diferentes grados de repelencia: el sitio menos repelente tuvo una rata de infiltración, en una prueba de 10 minutos de duración, equivalente a 204 mm h^{-1} , mientras que en el más repelente dicha rata fue de sólo 36.6 mm h^{-1} , valores promedio de tres repeticiones por sitio.

Escorrentía y erosión

El hecho de retardar la velocidad de entrada del agua al suelo en un terreno cuya superficie tenga algún gradiente de pendiente, puede llevar a que la rata de aporte de agua sobrepase su rata de infiltración y a que se genere un excedente de humedad que empezará a fluir por encima de la superficie del suelo. Si no se tiene, gradiente de pendiente, se presentará un encharcamiento del terreno. Sin embargo,

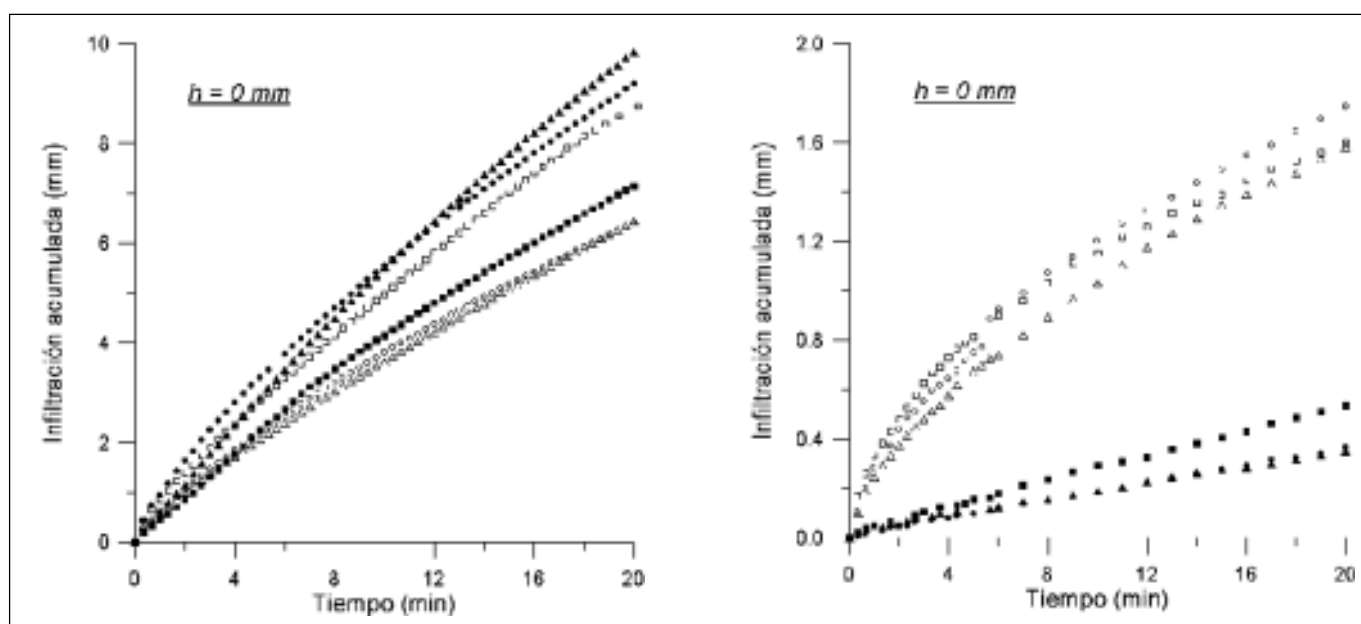


Figura 6. Curvas de infiltración obtenidas en laboratorio con diferentes muestras, empleando agua (símbolos negros) y etanol (símbolos blancos) como líquidos infiltrantes. **a.** En suelo no repelente al agua. **b.** En suelo repelente al agua. (Tomadas de **Moral et al.**, 2003).

el desarrollo de escorrentía puede verse afectado por la distribución de la repelencia al agua en el terreno.

Jaramillo (1992) observó en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia), que la escorrentía no se presenta como la manifestación hidrológica más frecuente, a pesar de darse condiciones favorables a su desarrollo, como vertientes inclinadas, presencia de repelencia al agua de considerable extensión e intensidad y un clima húmedo, posiblemente porque (1): las lluvias, normalmente, no son de alta intensidad y por lo tanto el aporte no sobrepasa la capacidad de infiltración; (2): la hidrofobicidad se presenta, predominantemente, en forma de parches pequeños, lo que permite la entrada del agua por los cuerpos de suelo no repelentes a ella y su posterior redistribución al interior mediante el flujo lateral subsuperficial y/o (3): los Andisoles no repelentes al agua en esta cuenca tienen abundantes macroporos que actúan como vías de flujo preferencial y pueden movilizar rápidamente grandes volúmenes de agua.

Moral et al. (2003) establecieron el valor de la infiltración potencial⁴ que deberían presentar los suelos arenosos en España y encontraron que no estaban captando la cantidad de agua que les permitía su condición textural, por lo que estaban dejando un gran excedente de agua en su superficie, que se convertía en escorrentía y que inducía severas manifestaciones de erosión en el terreno estudiado (Tabla 2).

Tabla 2. Infiltración acumulada e infiltración potencial en un tiempo de 20 minutos en suelos arenosos repelentes al agua del Parque Natural Doñana, España. (Tomados de **Moral et al.**, 2003).

Infiltración Media Acumulada (mm)		Infiltración Potencial (mm)	
En campo	En laboratorio	En campo	En laboratorio
3.24	0.45	16.49	6.54

Con respecto a la erosión, aunque se acepta el hecho de que la repelencia al agua puede favorecerla, **Shakesby et al.** (2000) identificaron tres aspectos que hacen difícil el estudio y entendimiento de la relación hidrofobicidad-erosión:

- Cuando se presenta repelencia al agua, su influencia rara vez es cuantificada y aislada de la influencia de otros posibles factores.
- No está claro si las medidas puntuales de la hidrofobicidad son importantes a la hora de explicar las

pérdidas de suelo en áreas de tamaños y propiedades variables: efecto de la escala de trabajo.

- La hidrofobicidad se manifiesta temporalmente, pudiendo desaparecer durante períodos importantes, cuando el suelo está sometido a humedecimiento intenso; durante estos períodos la relación hidrofobicidad-erosión no se puede estudiar, perdiéndose continuidad en las evaluaciones y dificultándose los estudios de largo plazo.

Shakesby et al. (2000) establecieron parcelas experimentales de diferentes tamaños en lotes bajo cobertura de pino (*Pinus pinaster*) y de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), con pendientes comprendidas entre 14 y 22%; algunos sitios habían sufrido incendios fuertes dos años atrás. Sometieron las parcelas a simulación de lluvia y midieron las pérdidas de suelo, la cantidad de escorrentía producida y la cantidad de sedimentos en suspensión durante varios períodos (Tabla 3). Observaron que la hidrofobicidad era un factor activo en la erosión de los suelos que sufrieron quema, por haber incremento en el aporte de sedimentos susceptibles de ser transportados por los flujos de agua superficiales; el desprendimiento de partículas por salpicadura ("splash") en el simulador de lluvia fue 85 y 59% mayor, en promedio, en el suelo fuertemente repelente al agua (WDPT > 3600 s) que en su equivalente hidrofílico, al compararlos en pendientes horizontal y de 15°, respectivamente; el suelo hidrofílico se humedecía y se sellaba rápidamente, impidiendo la salpicadura, mientras que el hidrofóbico permanecía seco, no sellaba y, por tanto, era sometido a desprendimiento de partículas durante más tiempo, aún cuando se alcanzaba a formar una película de agua sobre él, lo que explica el comportamiento observado.

Shakesby et al. (2000) señalan que la magnitud del efecto que tiene la hidrofobicidad sobre la erosión depende fuertemente de la continuidad de la repelencia al agua en el terreno. Dicha continuidad afecta el tamaño del área de muestreo utilizada para estudiar esta relación, puesto que en parcelas grandes se pueden involucrar vías de flujo preferencial que captan parte del flujo superficial y lo transportan al interior del suelo, interrumpiendo la continuidad en la hidrofobicidad, por lo que en ellas dicho flujo puede tener valores mucho menores que en parcelas más pequeñas.

De acuerdo con **Shakesby et al.** (2000), la presencia de grietas, huecos, madrigueras, canales de raíces, macro poros y/o parches no hidrofóbicos pueden ser vías importantes de infiltración de agua en el suelo y, junto con la

⁴ **Infiltración potencial:** Infiltración que debería presentar el suelo, si no fuera repelente al agua, durante un período de tiempo de observación dado.

Tabla 3. Cantidad de partículas desprendidas por salpicadura en un simulador de lluvia, en suelos repelentes y no repelentes al agua de Portugal, sometidos a diferentes intensidades de lluvia y con dos gradientes de pendiente. (Datos tomados de *Shakesby et al.*, 2000).

Pendiente	Lámina de agua aplicada (mm)	Tiempo de aplicación (min)	Rata de desprendimiento por salpicadura (g mm^{-1})*		Relación de las tasas de desprendimiento entre suelos hidrofóbico/hidrofílico
			Suelo hidrofóbico	Suelo hidrofílico	
Horizontal	3.5	10	0.333	0.169	1.97
	3.9	10	0.436	0.254	1.72
	4.1	10	0.769	0.434	1.77
	10.0	20	0.362	0.189	1.92
					1.85 Promedio
15°	4.4	15	0.418	0.253	1.65
	4.4	15	0.316	0.230	1.37
	7.7	20	0.385	0.280	1.38
	7.7	20	0.433	0.223	1.94
					1.59 Promedio

* Gramos de material desprendido por milímetro de lámina de agua aplicado.

distribución de la vegetación en el terreno, son características críticas a la hora de definir el riesgo de erosión en suelos repelentes al agua. Cabe agregarle el espesor de la capa de hojarasca acumulada sobre el suelo pues, como lo observó **Jaramillo** (1992), en ella puede acumularse una buena cantidad de agua que, luego de un tiempo prolongado de contacto con el suelo hidrofóbico, puede cambiar su ángulo de contacto y penetrar en él. Una capa de hojarasca espesa es un disipador excelente de la energía con que llegan las gotas de lluvia al suelo y, como ya se mencionó, los suelos hidrofóbicos son disgregados fácilmente por ellas.

Estructura del suelo

Varios autores, señalan que la presencia de compuestos repelentes al agua contribuye al desarrollo de la estructura del suelo. **Baver et al.** (1973) y **Porta et al.** (1994) plantean la posibilidad de que la presencia de ceras, grasas y resinas impidan la disgregación de los agregados y aumenten así su estabilidad, al hacerlos impermeables al agua. **Hillel** (1998) destaca como uno de los mecanismos que ayudan en la formación y estabilización de la estructura del suelo, la cementación producida con materiales orgánicos que reducen la humectación de los agregados, actividad que llevan a cabo los compuestos hidrofóbicos.

Giovannini et al. (1983) sometieron algunas muestras de suelo repelente al agua (Luvisol gleic vertic, franco arcilloso) de Italia, bajo cobertura de pastos, a extracción selectiva con benceno y con una mezcla de acetilacetona en benceno. El benceno extrajo sustancias orgánicas hidrofóbicas y la mezcla extrajo, además de las anteriores, cementantes órgano-metálicos de Fe y Al. Cuando los extractos fueron aplicados a partículas de arena silicatada completamente humectables, se transformaron en repelentes al agua, demostrándose el carácter hidrofóbico de

ellos. Las muestras de suelo repelente al agua, después de haber sido sometidas a las extracciones, redujeron el valor del índice de estabilidad estructural utilizado hasta en 20% con benceno y hasta en 40% con la mezcla, en comparación con los índices obtenidos en muestras que no fueron sometidas a extracción, demostrándose el efecto estabilizador de la estructura en estos suelos por los cementantes extraídos.

A pesar de las evidencias presentadas, **Jaramillo** (1992) observó que una buena cantidad de los parches de los Andisoles repelentes al agua en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) se presentaban muy polvorientos en seco y con estructura poco desarrollada y de tamaño fino en húmedo, situación que lo llevó a pensar que se estaba presentando un deterioro de la estructura de los suelos cuando aparecía la repelencia al agua.

Para confirmar lo anterior, **Jaramillo** (2001a) estudió 21 muestras de Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia): 18 fueron tomadas en suelos bajo cobertura de *Pinus patula* y 3 bajo cobertura de *Cupressus lusitanica*. Las muestras se secaron al aire, sin disturbarlas y se les determinó la hidrofobicidad por el método WDPT en esa condición de humedad: 16 muestras resultaron extremadamente repelentes al agua (WDPT > 3600 s), 4 fueron severamente repelentes (WDPT entre 600 y 3600 s) y una no fue repelente al agua (WDPT < 5 s).

Las muestras secadas al aire se sometieron a un cernido suave, en seco, durante un minuto, a través de un tándem de tamices; se pesó el material retenido en cada tamiz y se calculó el porcentaje representado por él, dentro de toda la muestra, con base en el peso seco al horno de toda la muestra. Con los resultados de distribución de agregados en seco se calcularon algunos índices que permitieron visualizar lo

que estaba pasando con su estructura. Los índices calculados mostraron que, en efecto, se presentaba degradación estructural en los suelos repelentes al agua, teniendo en cuenta que el tamizado se hizo en seco, casi todas las muestras (excepto una) presentaron más de 40% de los agregados con tamaños menores a 1.5 mm de diámetro; el Diámetro Medio Estimado para el 50% de los agregados, en promedio fue de 1.46 mm y el Porcentaje de Agregados Inestables (suma de agregados mayores de 2 mm y menores de 0.25 mm) promedio fue de 67.23% (Jaramillo, 2001a).

Roy *et al.* (2000) también encontraron en Canadá un fuerte deterioro estructural que se manifestó como una pulverización completa de los primeros centímetros superficiales (hasta 15 cm) del suelo, en 15 de los 27 sitios con suelos repelentes al agua.

Generación de vías de flujo preferencial

Según Doerr *et al.* (2000), el *flujo preferencial* es el movimiento vertical concentrado del agua por una vía preferencial, a través de la matriz del suelo. Las *vías de flujo preferencial* son caminos que permiten la concentración del flujo y el movimiento del agua (ver Figura 7). Se diferencian dos tipos de flujo preferencial:

- **Flujo en macroporos:** Es el movimiento a lo largo de grietas, canales o agujeros que son más grandes de lo que cabe esperar por la distribución de tamaño de partículas del suelo.
- **Flujo digitado** (o en forma de dedos): Es el movimiento que se produce en cuerpos aislados a través de un medio homogéneo.

El origen de las vías de flujo preferencial es muy variado (Dekker & Ritsema, 2000; Carrillo *et al.*, 2000a, b; Hendrickx & Dekker, 1991; Hendrickx *et al.*, 1993; Hillel, 1998; Selker *et al.*, 1999; Stephens, 1996):

- Puede tratarse de rasgos preexistentes en el suelo como lentes de arcilla o de arena, o en la roca, como fisuras, diaclasas, etc.
- Pueden formarse físicamente por agrietamiento de arcillas expansivas debido a procesos de humedecimiento y secamiento.
- Pueden formarse por actividad biológica como en la construcción de túneles o madrigueras por lombrices, hormigas, roedores y otros animales o por la presencia de canales dejados por la descomposición de las raíces.
- El hombre, mediante la manipulación del suelo, sobre todo por efecto de su mecanización, puede generar vías de flujo preferencial.

- Eventos geomorfológicos que alteran las vertientes como subsidencia o rupturas superficiales del terreno.
- Discontinuidades texturales en las que hay un horizonte superficial de textura más fina que la textura del horizonte que se encuentra por debajo de él.
- Frentes inestables de humedecimiento.
- Presencia de materiales repelentes al agua.
- Encharcamiento de agua en depresiones superficiales que incrementan la presión hidrostática que ayuda a la entrada del agua en el suelo.
- Diferencias en densidad aparente.
- Presencia de aire atrapado y comprimido por delante de un frente de humedecimiento.
- Presión de entrada de aire más negativa que el potencial de humedad del frente de humedecimiento.
- Incremento de la conductividad hidráulica con la profundidad.
- Intensidad de lluvia o de riego menor que la conductividad hidráulica.
- Redistribución de la infiltración al terminar un aguacero o un riego.
- Incremento en el contenido de humedad del suelo con la profundidad.

En los macroporos, el flujo, según Selker *et al.* (1999), puede mover cantidades considerables de agua; si un canal de una lombriz tiene 100 veces el diámetro de un poro fino intergranular, puede transportar 10 000 veces el flujo por unidad de área que mueve el suelo que está a su alrededor, bajo un flujo gravitacional.



Figura 7. Vías de flujo preferencial (áreas rojas) en suelos arenosos homogéneos de dunas de Holanda. Foto tomada de Dekker (1998).

El flujo digitado se relaciona más directamente con los suelos repelentes al agua y, según **Selker et al.** (1999), ocurre sólo en condiciones de no-saturación. **Hillel** (1998) indica que este tipo de flujo también se presenta cuando hay discontinuidad textural en el suelo, con un horizonte de textura más gruesa debajo de uno con textura más fina o cuando por delante de un frente de humedecimiento que está avanzando queda aire atrapado que lo frena diferencialmente.

Hill & Parlange, citados por **Selker et al.** (1999) y por **Hillel** (1998), notaron que cuando el agua entraba a un suelo de textura gruesa, seco o con poca humedad, ella tenía la tendencia a moverse en regiones aisladas que llamaron “dedos” y comprobaron que los dedos se forman cuando la velocidad frontal del flujo es menor que la conductividad hidráulica saturada del medio en que aquel se produce (ver Figura 8).

Cuando el suelo posee una capa de material repelente al agua intercalada entre capas de material humectable, si hay formación de dedos, éstos se desarrollan en la capa humectable que se encuentra por debajo de la capa repelente al agua (**Carrillo et al.**, 2000a, b).

Bauters et al. (1998) estudiaron el efecto del grado de repelencia al agua en el comportamiento del frente de humedecimiento de la infiltración en una arena cuarcítica y encontraron que la presencia o ausencia de hidrofobilidad en el suelo controló el ancho y la velocidad de los dedos, así como la presión de entrada del agua en dicho suelo (Tabla 4).

Una cualidad sobresaliente de los dedos es su *recurrencia*. **Ritsema & Dekker** (1996, 2000), **Ritsema** (1998) & **Wang et al.** (2003) comprobaron que, en arenas repelentes al agua, los dedos tienden a ubicarse en las mismas localizaciones durante sucesivos eventos de precipitación o de riego, aún cuando las diferencias en el contenido de humedad sean pequeñas. Atribuyen este comportamiento a la histéresis característica de la retención de humedad que tienen esos suelos y sostienen que esta recurrencia puede mantenerse por tiempo ilimitado, mientras que no se produzcan cambios drásticos, como por ejemplo, los que produce el laboreo en tierras de cultivo.

Según **Selker et al.** (1999), la importancia del flujo preferencial radica en que acelera el transporte de agua y de contaminantes a través de los materiales del suelo. Ade-

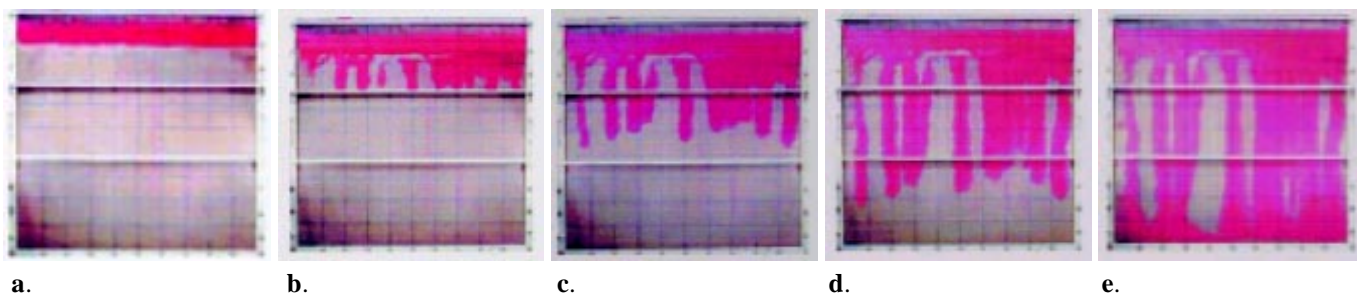


Figura 8. Formación de “dedos” por redistribución de 500 mL de agua con un colorante en una fracción de arena cuarcítica de entre 0.5 y 0.8 mm de diámetro, ligeramente humedecida antes de la aplicación del agua y empaquetada homogéneamente en una celda plástica de 1 x 1 x 0.01 m en laboratorio, en diferentes tiempos después de la aplicación. **a.** Tiempo cero: se aplicó el agua. **b, c, d** y **e**, corresponden al avance de los dedos a los 2, 6, 18 y 230 minutos después de aplicada el agua, respectivamente. Tomadas de **Wang et al.** (2003).

Tabla 4. Ancho, humedad y velocidad de crecimiento de los dedos formados en arenas cuarcíticas con diferente grado de repelencia al agua y presión de entrada del agua en ellas. Datos de **Bauters et al.** (1998).

Repelencia al agua (%)*	WDPT (s)	Ancho del dedo (cm)	Contenido de humedad en el frente (cm ³ cm ⁻³)	Velocidad en el frente (cm min ⁻¹)	Presión de entrada de agua (cm)
0	< 0.5	45	0.14	0.6	-6.0
3.13	40	2.1	0.40	1.7	-3.0
5.00	2400	2.8	0.41	3.1	-1.0
5.68	> 3600	2.7	0.38	3.6	2.0
9.01	> 3600	3.55	0.38	5.5	5.0

* Se define por la cantidad de arena altamente repelente al agua que hay en una mezcla de ella con arena normal.

más, por tratarse de un flujo restringido a un pequeño volumen, la rata de movimiento vertical se incrementa enormemente, generándose menor absorción de agua en el suelo y, por lo tanto, menor disponibilidad de ella para las plantas.

Shakesby et al. (2000) establecieron la importancia que tienen los macroporos, como vías de flujo preferencial, en el movimiento de agua en suelos bajo cobertura boscosa. Citan datos de Ferreira quien registró, en un suelo seco de una plantación de pino que había sido quemada, una infiltración de 250 mm h⁻¹ encima de un canal de una raíz quemada de un tronco de árbol muerto, mientras que en el suelo repelente al agua que estaba alrededor, libre de raíces, la infiltración fue de 1.8 mm h⁻¹.

El comportamiento del flujo de agua en presencia de vías de flujo preferencial impone observar precauciones extremas cuando se quiere evaluar la infiltración del agua en el suelo con los anillos infiltrómetros; las diferencias en el flujo entre las vías preferenciales y el suelo normal pueden llevar a establecer modelos de infiltración erróneos. También, el tamaño de la muestra es definitivo en el resultado del ensayo. El incremento en la velocidad del flujo en el suelo y la disminución en el tiempo de contacto de éste con el agua, hacen que las reacciones entre estos dos componentes sean menos probables y menos eficientes, lo que hace que los pesticidas y contaminantes puedan llegar más fácilmente a los acuíferos, contaminándolos (**Selker et al.**, 1999). **Hendrickx et al.** (1993) comprobaron que la susceptibilidad a la contaminación de aguas subsuperficiales es mayor en suelos que tienen capas superficiales repelentes al agua. Aplicaron 15 L de una solución de KBr, con una concentración de 11 g Br L⁻¹, a 6 suelos arenosos de Holanda, 3 con una capa superficial repelente al agua y 3 sin ella, es decir, humectables; 5 semanas después de montado el ensayo y cuando los suelos habían recibido una precipitación acumulada de 120 mm, las cantidades de bromuro presentes en el nivel freático por debajo de las capas repelentes al agua eran entre 6 y 13 veces mayores que las encontradas en el nivel freático de los suelos que no tuvieron problemas de repelencia al agua.

Evaluación de la repelencia al agua en suelos

Para evaluar la hidrofobicidad **Jaramillo** (1996, 2004) cita varios de los métodos que se han propuesto aunque presentan limitaciones prácticas para su implementación. Para evaluaciones de rutina se han desarrollado algunos métodos prácticos y de fácil aplicación como el llamado **WDPT** (Water Drop Penetration Time) o el método conocido como **MED** (Molarity Ethanol Drop). Estos métodos son los de mayor utilización.

Para determinar el WDPT, que mide la persistencia de la repelencia, se colocan varias gotas de agua destilada sobre la superficie del suelo y se contabiliza el tiempo que gasta cada una de ellas en penetrar completamente. La persistencia de la repelencia al agua se establece con el tiempo promedio de todas las gotas utilizadas. Se presentan casos en los que el WDPT no se puede establecer con un valor absoluto; entonces hay que caracterizarlo con un valor condicionado (> : mayor que...), debido a que en tiempos largos las gotas empiezan a deformarse y reducen su tamaño por efecto de la evaporación, como lo observó **Jaramillo** (1992) en gran cantidad de suelos en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) que tuvieron WDPT > 10800 segundos. Ante esta situación, teniendo en cuenta la gran cantidad de valores que se pueden obtener en su determinación, **Dekker & Jungerius** (1990) propusieron clasificar la persistencia de la repelencia al agua en el suelo mediante el uso de las clases que se presentan en la Tabla 5.

El MED mide el grado o la severidad de la repelencia al agua y consiste en determinar la concentración (molaridad o porcentaje) de aquella solución de etanol que penetra en el suelo en 10 segundos o menos (según **King**, 1981 y **Roy & McGill**, 2002) o en 5 segundos o menos (según **Dekker & Ritsema**, 1994). **Jaramillo** (2001b), mediante análisis de regresión encontró que, en Andisoles, el tiempo límite de observación más adecuado era de 5 segundos. En las Tablas 6 y 7 se presentan dos sistemas utilizados ampliamente para caracterizar y clasificar la severidad de la repelencia al agua en el suelo.

Con cualquiera de los métodos, si la determinación se va a hacer en laboratorio, se recomienda que las muestras sean sometidas a un tamizado suave para trabajar sobre la fracción menor a 1 mm. Las determinaciones se ven afectadas por el contenido de humedad inicial de las muestras y por el tiempo que dure el tamizado, así como por la temperatura y la humedad relativa del espacio en que se hace la determinación. En todos los casos la variabilidad de las determinaciones es alta, aún tomando precauciones para controlar las condiciones bajo las cuales se hace la determinación.

Tabla 5. Clasificación del WDPT propuesta por **Dekker & Jungerius** (1990).

Clase de persistencia	Nivel de persistencia de la repelencia al agua	Valores del WDPT (s)
0	No repelente al agua	< 5
1	Ligeramente repelente al agua	5 – 60
2	Fuertemente repelente al agua	60 – 600
3	Severamente repelente al agua	600 – 3600
4	Extremadamente repelente al agua	> 3600

Tabla 6. Clasificación de la severidad de la repelencia al agua evaluada por el método del MED y expresada como molaridad, propuesta por **King** (1981).

Clase de severidad	Rango de valores del MED (M)
No repelente	0
Repelencia baja	0.2 – 1.0
Repelencia moderada	1.2 – 2.2
Repelencia severa	2.4 – 3.0
Repelencia muy severa	> 3.2

Tabla 7. Clases de severidad de la repelencia al agua, medida con el método del MED expresado en % de alcohol, utilizadas por **Dekker & Ritsema** (1994) y por **Dekker** (1998) en suelos arenosos de dunas de Holanda.

Clase de grado de repelencia al agua*	Rango de valores de concentración de etanol (%)
No repelente	0
Ligeramente repelente	1 – 3
Moderadamente repelente	4 – 6
Fuertemente repelente	7 – 14
Severamente repelente	15 – 20
Extremadamente repelente	> 20

* Los nombres que se presentan para las clases no están descritos en los documentos citados en el título, sino que han sido propuestos por **Jaramillo** (2004).

Manejo de la repelencia al agua en el suelo

Evitar la acumulación excesiva de hojarasca sobre el suelo

Sabiendo que los compuestos hidrofóbicos que se acumulan en el suelo provienen principalmente de la descomposición inicial de la materia orgánica, si se evita la acumulación excesiva de este material, se minimiza el riesgo de que se desarrolle la repelencia al agua en el suelo.

Chan (1992) encontró un alto grado de repelencia al agua en un Alfisol que se había explotado bajo siembra directa (labranza cero) durante un largo tiempo, con lo que acumuló una importante capa de hojarasca que creó las condiciones óptimas para que se desarrollara en él una alta población fungal con una densa masa de hifas hidrofóbicas, situación que no se dio en el mismo suelo, bajo un sistema de laboreo convencional. **Hallett et al.** (2001) también observaron que aquellos suelos que no eran sometidos a mecanización presentaban mayores valores de índice de repelencia (IR) que los que sí se sometían a esta práctica.

La acumulación de materia orgánica fresca sobre el suelo se puede evitar de varias formas:

- Favoreciendo su descomposición rápida; el laboreo proporciona una buena aireación, facilitando la oxidación en la capa de hojarasca.
- La descomposición de la materia orgánica puede acelerarse si se promueve una buena actividad microbológica, por ejemplo, aportando nutrientes por medio de fertilizantes.
- Sometiendo el suelo a quemas controladas, es decir, con intensidad del fuego baja y cuando el suelo está húmedo.
- Otra forma de eliminar la hojarasca del suelo es, simplemente, extrayéndola del terreno.

Mecanización del suelo

En laboratorio se ha observado que la abrasión en los granos de arena reduce el grado de hidrofobicidad de los mismos (**King**, 1981; **Ma'shum & Farmer**, 1985; **Wallis et al.**, 1990a; **Crockford et al.**, 1991). En el campo, el laboreo puede cumplir esta función de abrasión sobre los agregados, removiendo algo de los recubrimientos orgánicos y/o de las hifas de hongos que tengan adheridos, reduciendo su grado de repelencia.

King (1981) notó que los agricultores en Australia reducían el grado de repelencia al agua sometiendo los suelos a laboreo durante la lluvia o inmediatamente después de ella, lo que puede estar relacionado con el efecto de abrasión mencionado y/o con un efecto de dilución de los agregados repelentes al agua en el resto del suelo, como lo sugieren varios trabajos citados por **Wallis & Horne** (1992).

Adicionar arcilla o materiales terrosos arcillosos

Otra práctica que ayuda a diluir el componente hidrofóbico es la adición de arcilla, cuando el suelo es de textura gruesa. El Departamento de Agricultura del Oeste de Australia (**DWA**, 2000) destaca que la adición de arcilla a suelos de textura gruesa repelentes al agua produce efectos como:

- Incrementar la producción en cultivos y pastos: La producción de cebada en un suelo tratado con arcilla se incrementó en 1.2 t ha⁻¹ y este incremento se mantuvo durante los 8 años siguientes a la aplicación del correctivo.
- Incrementar la infiltración de agua. En un suelo tratado con arcilla se incrementó 3 veces la rata de infiltración.

- El suelo se humedece uniformemente.
- La germinación de semillas de malezas es uniforme, lo que permite hacer un mejor control de ellas.
- Se controla la erosión eólica.
- Se aumenta la retención de nutrientes en el suelo.
- Se incrementa la actividad biológica en el suelo.

El mismo organismo ha establecido que la adición de arcilla al suelo superficial repelente al agua puede hacerse mezclando con él parte del subsuelo; la mezcla de 100 t ha⁻¹ de dicho material que contenga 30% de arcilla, con los primeros 10 cm del suelo, incrementa el contenido de arcilla entre 3 y 4%, cantidad suficiente para tener resultados positivos y estables durante los siguientes 8 años.

Ward & Oades (1993) en ensayos de laboratorio, encontraron que la caolinita saturada con Na⁺, en comparación con la montmorillonita, fue la arcilla más eficiente en el proceso de reducción de la repelencia al agua en los suelos arenosos. La aplicación del equivalente a 5 t ha⁻¹ de caolinita redujo la repelencia al agua a niveles tolerantes agrónomicamente (MED < 1.2 M), a pesar de que tiene menor superficie específica que la montmorillonita.

Aumentar el pH del suelo

También se ha ensayado el encalamiento como una alternativa de manejo para reducir el grado de repelencia al agua. En estudios de laboratorio se ha observado que solventes con cierto grado de alcalinidad son capaces de remover compuestos hidrofóbicos de la superficie de las partículas repelentes al agua (**Roberts & Carbon**, 1972).

Las diferencias en solubilidad que se presentan entre los ácidos húmicos y fúlvicos pueden sustentar el hecho de que aumentando el pH se pueda reducir el grado de repelencia al agua en el suelo, debido a que a pHs altos ambos grupos de compuestos son solubles y pueden ser removidos del suelo evitando que generen hidrofobicidad y favoreciendo su humectabilidad.

Los estudios llevados a cabo por **Karnok et al.** (1993) en parches hidrofóbicos de un campo de golf mostraron que la aplicación de soluciones de NaOH 0.1 M al suelo eleva su pH y reduce su grado de repelencia al agua, al tiempo que promueve una pérdida importante de materiales orgánicos en los que pueden ser eliminados parte de los compuestos hidrofóbicos responsables del fenómeno.

Agregar agentes humectantes

Los agentes humectantes, conocidos como *surfactantes* o *agentes de superficie activa*, son sustancias

anfifílicas cuyo grupo polar es hidrofílico y contiene una variedad de átomos como O, S, N o P, que se encuentran en grupos funcionales alcohol, ácido, sulfato, entre otros. La parte no polar es hidrofóbica o lipofílica y, en general, es un grupo hidrocarbonado de tipo alquil o alquil – benceno (**Salager**, 2002).

Para manejar los suelos repelentes al agua se ha recurrido al uso de surfactantes que al formar soluciones con el agua reducen su tensión superficial (**Tensoactivos**) de manera que, al colocar dicha solución en contacto con una superficie sólida e hidrofóbica, el ángulo de contacto se reduce considerablemente y el agua puede penetrar más fácilmente. La efectividad de los agentes humectantes depende del tipo de suelo, del tipo de producto, de la dosis y grado de dilución del producto, del método de aplicación, del tipo de cultivo y del manejo del riego. Además, la radiación ultravioleta y el movimiento de partículas de suelo por el viento pueden alterar la vida útil de los agentes humectantes en el suelo (**Wallis et al.**, 1990b; **Wallis & Horne**, 1992).

Kostka et al. (2002) aplicaron dos surfactantes comerciales (Primer 604 y Aqueduct) en las dosis recomendadas por los fabricantes, a suelos repelentes al agua de diferentes localidades de Estados Unidos de América, Holanda, Australia y Alemania. En todos los casos encontraron que se redujo el grado de repelencia durante el tiempo que duró el ensayo: 3 meses con Primer 604, aplicándolo mensualmente y 3 semanas con Aqueduct, aplicándolo semanalmente. Además, se incrementaron la rata de infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua en los suelos y se redujeron las pérdidas de agua por evaporación y por escorrentía.

En la Figura 9 se aprecia el efecto que tuvo la aplicación de agentes humectantes sobre la rata de infiltración en un suelo franco arenoso, severamente repelente al agua, de California, elaborada con datos de **Letey et al.** (1962).

El efecto de los surfactantes sobre el grado de repelencia al agua ha sido bastante inconsistente en su comportamiento. Además, parece que su efecto no es muy duradero en lo que respecta a la disminución de la persistencia de la repelencia al agua: a los 3 ó 4 meses de aplicado, se vuelven a incrementar los valores de WDPT, con respecto a los obtenidos un mes después de la aplicación (**Kostka**, 2000). Además, a pesar de sus efectos benéficos, debe tenerse en cuenta que los agentes humectantes pueden tener efectos fitotóxicos, generados por contacto prolongado del producto con las hojas o por absorción del producto por las raíces.

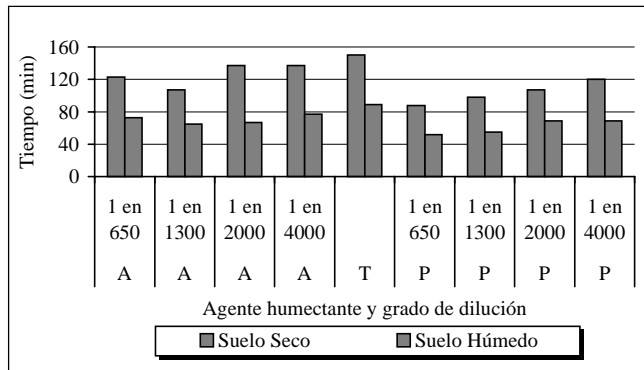


Figura 9. Efecto de la aplicación de diferentes dosis de dos agente humectantes no identificados (A y P) sobre el tiempo gastado por 4 pulgadas de solución en penetrar en un suelo repelente al agua, bajo dos condiciones de humedad. En la condición de suelo húmedo la infiltración fue de agua sola pues para humedecerlo se aplicó la solución correspondiente al tratamiento del caso. La letra T identifica el testigo (sólo recibió agua). El grado de dilución corresponde a 1 parte del producto disuelto en las partes de agua indicadas. Ensayos hechos en basines, en campo. (Gráfica elaborada con base en datos de **Letey et al.**, 1962).

Aplicar riego

Wallis & Horne (1992) y **Wallis et al.** (1990b) plantean que en algunos sistemas de explotación, la aplicación de agua por medio del riego puede ser una alternativa viable para mantener el suelo en un estado de humedad que impida la manifestación de la repelencia al agua. Dicha práctica es frecuentemente usada en campos deportivos durante las épocas cálidas secas, con lo que se reduce la severidad de los parches secos. El uso de riegos livianos, con periodos de retorno cortos, es una práctica eficiente para reducir los efectos de la repelencia al agua, para favorecer el crecimiento de la vegetación y para mejorar la rata de infiltración en suelos repelentes al agua, que los sistemas con altas tasas de aplicación y periodos de retorno largos.

Cambiar el contenido orgánico del suelo

Franco et al. (2000) estudiaron el efecto que tenía la adición de carbono orgánico soluble (COS) sobre la repelencia al agua en arenas severamente hidrofóbicas. Para esto, sometieron arena extremadamente repelente al agua a un calentamiento de 70°C en agua, durante 2 horas; microfiltraron el sobrenadante cuando se enfrió y lo agregaron a 3 sustratos: arena repelente al agua, arena lavada con agua hasta remover todas las partículas de materia orgánica, y arena incinerada a 600°C hasta convertirla en arena completamente humectable. Se estableció un tratamiento testigo en el cual sólo se adicionó agua a cada tipo de arena y un control absoluto en el que no se

aplicó nada a los 3 tipos de arena. Los resultados de este experimento pueden verse en la Tabla 8.

En el anterior experimento la adición de COS a las arenas redujo de manera altamente significativa ($P < 0.01$) el valor del MED, con respecto al control absoluto. Este comportamiento sugiere la posibilidad de que cambiando el tipo de materia orgánica que se adiciona, se pueda tener una reducción importante en el grado de repelencia al agua en el suelo. Este cambio puede generarse modificando el tipo de cobertura vegetal como lo han sugerido **Jaramillo** (1992) y **Harper et al.** (2000), o adicionando abonos orgánicos aunque, esto debe ser estudiado cuidadosamente antes de recomendarlo como práctica de manejo de la repelencia al agua del suelo en condiciones de campo.

Extraer la parte del suelo que es repelente al agua

Otra actividad que puede resolver el problema de la repelencia al agua consiste en retirar la parte hidrofóbica. La aplicabilidad de esta alternativa está condicionada por el tipo de explotación que se tenga y, sobre todo, por el espesor y ubicación de la capa repelente en el suelo, por el área cubierta por el fenómeno y por el espesor del horizonte superficial del mismo. **Jaramillo** (1992) observó la realización de esta práctica en los Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Medellín, Colombia) que se encontraban con plantaciones forestales de pinos y cipreses, conocida localmente como “**Extracción de tierra de capote**” y comprobó que, efectivamente, después de que el material superficial era retirado, el suelo “nuevo” al quedar expuesto era completamente humectable.

Debe tenerse en cuenta que con la extracción de tierra de capote se está trasladando el problema de la repelencia al agua a otros lugares y que, dependiendo del destino que tenga el material removido, se puede estar afectando alguna actividad productiva; por ejemplo, si el material retirado es utilizado en viveros, tanto para plantas orna-

Tabla 8. Efecto de la aplicación de carbono orgánico soluble (COS) sobre el MED de dos tipos de arena. Adaptado de **Franco et al.** (2000).

Tratamiento	Valor del MED* (M) en	
	Arena repelente al agua	Arena lavada con agua
Control absoluto	2.5	0.8
Testigo con sólo agua	1.0	0.2
Con COS	0.3	0.0

* En la arena incinerada no hubo cambios en el MED, en todos los tratamientos fue igual a cero.

mentales como para plantaciones forestales o para cultivos que requieran trasplante, se pueden generar unas pérdidas altas de material vegetal por un suministro insuficiente de agua a las plántulas.

Conclusión

La repelencia al agua en los suelos es un fenómeno frecuente, del cual se conoce y entiende poco. Puede tener efectos notables sobre la productividad y la producción agropecuaria y forestal, sobre la erosión y sobre el comportamiento hidrológico del suelo. Su variabilidad, la manera como se expresa en el campo y el comportamiento que presenta este fenómeno hacen difícil su detección, su evaluación y su manejo y, sobre todo, generan dificultades en la modelación de ciertos atributos del suelo, útiles para hacer un uso eficiente y racional del mismo.

Bibliografía

- Bauters, T. W. J.; D. A. Dicarlo; T. S. Steehuis & J. Y. Parlange.** 1998. Preferential flow in water repellent sands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **62**: 1185-1190.
- Baver, L. D.; W. H. Gardner & W. R. Gardner.** 1973. Física de Suelos. 1a. ed. Española. UTEHA, México. 529 p.
- Bisdorn, E. B. A.; L. W. Dekker & J. F. Th. Schoute.** 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma* **56**: 105-118.
- Blake, J.** 2002. Water-repellent soils symptom of decline. [En línea]. Ground Cover N° 40. Grains Research and Development Corporation. Australia. [Consultada en septiembre de 2004]. Disponible en: <http://www.grdc.com.au>
- Caballero, B.** 2005. Variabilidad espacial de la hidrofobicidad en Andisoles bajo tres coberturas vegetales. Tesis Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 40 p.
- Carrillo, M. L. K.; J. Letey & S. R. Yates.** 2000a. Unstable water flow in a layered soil: I. Effects of a stable water repellent layer. *Sci. Soc. Am. J.* **64**: 450-455.
- . 2000b. Unstable water flow in a layered soil: II. Effects of a unstable water repellent layer. *Sci. Soc. Am. J.* **64**: 456-459.
- Chan, K. Y.** 1992. Development of seasonal water repellence under direct drilling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 326-329.
- Crockford, H.; S. Topalidis & D. P. Richardson.** 1991. Water repellency in a dry sclerophyll eucalypt forest - measurements and processes. *Hydrological Processes*. **5**: 405-420.
- DeBano, L. F.** 1971. The effect of hydrophobic substances on water movements in soil during infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **35**: 340-343.
- . 1981. Water repellent soils: a state - of - the -art. USDA. Forest Service. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. General Technical Report PSW - 46. California. 21p.
- . 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *J. Hydrol.* **231-232**: 4-32.
- Dekker, L. W.** 1998. Moisture variability resulting from water repellency in Dutch soils. Doctoral Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 240 p.
- . & **P. D. Jungerius.** 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Supplement* **18**: 173-183.
- Dekker, L. W. & C. J. Ritsema.** 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resour. Res.* **30** (9): 2507-2517.
- . 1995. Fingerlike wetting patterns in two water-repellent loam soils. *J. Environ. Qual.* **24**: 324-333.
- . 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *J. Hydrol.* **231-232**: 148-164.
- Dekker, L. W.; S. H. Doerr; K. Oostindie; A.K. Ziogas & C. J. Ritsema.** 2001. Water repellency and critical soil water content in a dune sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**: 1667-1674.
- Department of Agriculture Western Australia (DAWA).** 2000. Claying water repellent soils. [En línea]. Department of Agriculture Western Australia. [Consultada en noviembre de 2003]. Disponible en: <http://www.agric.wa.gov.au>
- Doerr, S. H. & 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 & R. P. D. Walsh.** 2000. Soil water repellency, its characteristics, causes and hydro-geomorphological consequences. *Earth Sci. Rev.* **51**: 33-65.
- Franco, C. M. M.; P. P. Michelsen & J. M. Oades.** 2000. Amelioration of water repellency: application of slow-release fertilizers to stimulate microbial breakdown of waxes. *J. Hydrol.* **231-232**: 342-351.
- Giovannini, G.; S. Lucchesi & S. Cervelli.** 1983. Water - repellent substances an aggregate stability in hydrophobic soil. *Soil Science* **135** (2): 110-113.
- Hallett, P. D.; T. Baumgartl & I. M. Young.** 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**: 184-190.
- Harper, R. J.; I. McKissock; R. J. Gilkes; D. J. Carter & P. S. Blackwell.** 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and landuse on water repellency. *J. Hydrol.* **231-232**: 371-383.
- Hendrickx, J. M. H. & L. W. Dekker.** 1991. Experimental evidence of unstable wetting fronts in homogeneous non-layered soils. In: Proceedings of ASAE National Symposium on Preferential Flow. Chicago. pp: 22-31.
- . & **O. H. Boersma.** 1993. Unstable wetting fronts in water-repellent field soils. *J. Environ. Qual.* **22**: 109-118.
- Hillel, D.** 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego, U.S.A. 771 p.
- Jaramillo, J. D. F.** 1992. Relación entre la acumulación de acículas (litter) de *Pinus patula* y la hidrofobicidad en algunos Andisoles de Antioquia. Tesis Magister en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira. 95 p.
- . 1996. Algunos estudios sobre repelencia al agua en Andisoles de Antioquia. Trabajo de promoción a Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 311 p.

- _____. 2001a. Efecto de la repelencia al agua sobre la estructura en los Andisoles. *Revista del ICNE* 7 (1): 71-88.
- _____. 2001b. Evaluación del método MED para medir el grado de repelencia al agua de Andisoles del oriente antioqueño. *Revista del ICNE* 7 (1): 51-62.
- _____. 2003. Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Informe de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 36 p.
- _____. 2004. Repelencia al agua en suelos: con énfasis en Andisoles de Antioquia. Informe de Año Sabático. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 197 p.
- _____. 2005. Humedad crítica y repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. En Prensa. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín.
- _____. ; **L. W. Dekker; C. J. Ritsema & J. M. H. Hendrickx.** 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *J. Hydrol.* 231-232: 105-111.
- Karnok, K. A.; E. J. Rowland & K. H. Tan.** 1993. High pH treatment and the alleviation of soil hydrophobicity on golf greens. *Agron. J.* 85: 983-986.
- 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.
- Kostka, S. J.** 2000. Amelioration of water repellency in highly managed soils and the enhancement of turfgrass performance through the systematic application of surfactants. *J. Hydrol.* 231-232: 359-368.
- _____. ; **L. W. Dekker; K. Oostindie; C. J. Ritsema; C. M. Miller & D. E. Karcher.** 2002. Advances in understanding and managing water repellent soils. [En línea]. (s.n.). [Consultada en noviembre de 2003]. Disponible en: <http://www.aquatrols.com/ResearchInfo/UnderstandingWaterRepellency.html>
- Letey, J.; N. Welch; R. E. Pelishek & J. Osborn.** 1962. Effect of wetting agents on irrigation of water repellent soils. *Cal. Agric.* 16 (12): 12-13.
- Ma'Shum, M. & V. C. Farmer.** 1985. Origin and assessment of water repellency of a sandy south Australian Soil. *Aust. J. Soil Res.* 23: 623-626.
- Moral, G. F. J.; F. López; E. Martínez De S. & A. Marcos.** 2003. Influencias hidrológicas y ambientales de la repelencia al agua en los suelos arenosos. [En línea]. Universidad de Extremadura. (s.n.). [Consultada en agosto de 2003]. Disponible en: <http://www.unizar.es>
- Pérez, D. V.; S. M. Simão & A. Salatino.** 1998. Identificação e caracterização da repelencia à água em alguns solos brasileiros. *R. Bras. Ci. Solo* 22: 197-207.
- Porta, J.; M. López-Acevedo & C. Roquero.** 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 807 p.
- Ritsema, C. J.** 1998. Flow and transport in water repellent sandy soils. Doctoral Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 215 p.
- _____. & **L. W. Dekker.** 1996. Water repellency and its role in forming preferred flow paths in soils. *Aust. J. Soil Res.* 34: 475-487.
- _____. 2000. Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *J. Hydrol.* 231-232: 308-319.
- Roberts, F. J. & B. A. Carbon.** 1972. Water repellence in sandy soils of south-western Australia. *Aust. J. Soil Res.* 10: 35-42.
- Roy, J. L. & W. B. McGill.** 1998. Characterization of disaggregated nonwetttable surface soils found at old crude oil spill sites. *Can. J. Soil Sci.* 78: 331-334.
- _____. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Sci.* 167: 8397.
- _____. ; **H. A. Lowen & R. L. Johnson.** 2000. Hydrophobic soils: Site characterization and tests of hypotheses concerning their formation. Final report on PTAC RFP #9 (1999/2000). Petroleum Technology Alliance Canada (PTAC) – Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP) – Environmental Research Advisory Council (ERAC). Alberta. Canadá. 87 p.
- Salager, J. L.** 2002. Surfactantes: Tipos y usos. Cuaderno FIRP S300-A. Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela. 53 p.
- Scott, D. F.** 2000. Soil wettability in forested catchments in South Africa; as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. *J. Hydrol.* 231-232: 87-104.
- Selker, J. S.; C. K. Keller & J. T. McCord.** 1999. Vadose zone processes. Lewis Publishers. Florida. 339 p.
- Shakesby, R. A.; S. H. Doerr & R. P. D. Walsh.** 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. *J. Hydrol.* 231-232: 178-191.
- Stephens, D. B.** 1996. Vadose zone hydrology. Lewis Publishers. Florida. 347 p.
- Vanegas, V. H. A.** 2003. Efecto de la temperatura de secado de Andisoles bajo dos coberturas vegetales sobre el grado de hidrofobicidad que desarrollan. Tesis Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 61 p.
- Wallis, M. G.; D. J. Horne & K. W. McAuliffe.** 1990a. 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. *New Zealand J. Agric. Res.* 33: 139-144.
- _____. 1990b. A study of water repellency and its amelioration in a yellow-brown sand. II: Use of wetting agents and their interaction with some aspects of irrigation. *New Zealand J. Agric. Res.* 33: 145-150.
- Wallis, M. G. & D. J. Horne.** 1992. Soil water repellency. *Advances Soil Sci.* 20: 91-146.
- Wang, Z.; A. Tuli & W. A. Jury.** 2003. Unstable flow during redistribution in homogeneous soil. *Vadose Zone J.* 2: 52-60.
- Ward, P. R. & J. M. Oades.** 1993. Effect of clay mineralogy and exchangeable cations on water-repellency in clay-amended sandy soils. *Aust. J. Soil Res.* 31: 351-364.
- Watson, C. L. & J. Letey.** 1970. Indices for characterizing soil water repellency based upon contact angle - surface tension relationships. *Soil Sci. Soc. Am. P.* 34: 841-844.
- Wilkinson, J. F. & R. H. Miller.** 1978. Investigation and treatment of localized dry spots on sand golf greens. *Agron. J.* 70: 299-304.

Recibido el 3 de febrero de 2006.

Aceptado para su publicación el 10 de abril de 2006.