

ORIGEM DOS COMPOSTOS HIDROFÓBICOS E SEUS EFEITOS EM FLORESTAS DE *Pinus* E *Eucalyptus*

ORIGIN OF HYDROPHOBIC COMPOUNDS AND THEIR EFFECTS IN *Pinus* AND *Eucalyptus* FORESTS

Eduardo Saldanha Vogelmann¹ Juliana Prevedello² José Miguel Reichert³

RESUMO

A hidrofobicidade pode ser entendida como a repelência do solo à água, dificultando o seu molhamento. Esse fenômeno está associado ao recobrimento das partículas do solo por substâncias orgânicas hidrofóbicas, sendo que atualmente existem inúmeros relatos de repelência à água em áreas de florestas de *Eucalyptus* e *Pinus*. Assim, este trabalho teve por objetivo revisar e elencar os aspectos relacionados à origem dos compostos hidrofóbicos e os seus efeitos na dinâmica da água no ambiente florestal, além de implicações no crescimento e desenvolvimento das árvores em florestas de *Eucalyptus* e *Pinus*. Reconhece-se que a vegetação local e algumas bactérias e fungos, em função da sua composição química, podem liberar substâncias orgânicas hidrófobas. Outro fator condicionante é a ocorrência de incêndios e queimadas, que induzem alterações nos compostos orgânicos e promovem o secamento do solo. Além disso, a composição granulométrica e o pH do solo podem estar indiretamente associados à ocorrência de repelência à água no solo. A existência de hidrofobicidade exige uma atenção diferenciada, principalmente em relação ao uso e manejo do solo, pois afeta diretamente o movimento da água na superfície e no interior do perfil de solo. Alterações na sortividade, redução da taxa de infiltração, escoamento superficial elevado e ocorrência de fluxo preferencial são os principais efeitos hidrológicos desse fenômeno. Em função das menores taxas de infiltração há aumento do escoamento superficial e redução da quantidade de água disponível, potencializando o processo erosivo e, conseqüentemente, afetando o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: hidrofobicidade; repelência a água; dinâmica da água; florestas plantadas.

ABSTRACT

Hydrophobicity can be understood as the soil water repellency or difficulty to soil wetting. This is associated with the coating of soil particles by hydrophobic organic substances and currently there are numerous reports of water repellency in forest areas of *Eucalyptus* and *Pinus*. Thus, this study aims at reviewing and listing the aspects related to the origin of hydrophobic compounds and the effects of the water dynamics in the forest environment, as well as implications in growth and development of trees in *Eucalyptus* and *Pinus* forests. It is recognized that the local vegetation and some bacteria and fungi, depending on their chemical composition, may release hydrophobic organic substances. Another risk factor is the occurrence of burnings which induce changes in organic compounds and promote soil drying. Furthermore, the particle size distribution and the soil pH may be indirectly associated with the occurrence of soil water repellency.

1 Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor do Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Rio Grande, Avenida Marechal Floriano Peixoto, 2236, CEP 96170-000, São Lourenço do Sul (RS), Brasil. eduardovogelmann@furg.br

2 Engenheira Florestal, Dra., Professora do Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Avenida Marechal Floriano Peixoto, 2236, CEP 96170-000, São Lourenço do Sul (RS), Brasil. julianapreve-dello@furg.br

3 Engenheiro Agrônomo, PhD., Professor do Departamento de Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. reichert.jm@gmail.com

The occurrence of hydrophobicity requires special attention regarding the soil use and management, because this repellency affects the water movement on the surface and inside the soil profile. Changes in sorptivity, reduction in water infiltration, increase in runoff and occurrence of preferential flow are the main hydrological effects of this phenomenon. Due to their lower infiltration rates there is increased the surface flow and reducing the amount of water available, increasing the erosion and, consequently affecting the growth and development of plants.

Keywords: hydrophobicity; water repellency; water dynamics; planted forests.

INTRODUÇÃO

O plantio de espécies florestais tem crescido acintosamente no Brasil, principalmente plantios florestais de eucalipto e pinus para a produção de madeira, celulose e resinas. No ano de 2010, o Brasil apresentou uma área ocupada por florestas plantadas de 6.510.693 ha, sendo 73% correspondente à área de plantios com o gênero *Eucalyptus* e 27% com *Pinus* (ABRAF, 2011).

O fenômeno da repelência à água, especialmente em áreas florestais, vem sendo mundialmente documentado por vários autores (JARAMILLO, 2006; DOERR et al., 2007). Em seu trabalho, Jaramillo (2004) e Doerr et al. (2007) citam registros de estudos de casos de hidrofobicidade em diversos países e nos cinco continentes. Entretanto, no Brasil, os estudos ainda são incipientes, principalmente nos solos sob plantios florestais. Atualmente, existem registros de solos hidrofóbicos nos estados do Pará, Maranhão, Rio de Janeiro (PÉREZ et al., 1998) e Rio Grande do Sul (VOGELMANN et al., 2010, 2012, 2013b) em áreas cultivadas com espécies de gramíneas e de campos naturais e, também, relatos da ocorrência de hidrofobicidade em áreas cultivadas com espécies arbóreas no Mato Grosso (JOHNSON et al., 2005) e em plantações de *Pinus* sp. no Paraná (CAMBRONERO et al., 2011).

A hidrofobicidade, pode ser entendida como a repelência do solo à água, dificultando o seu molhamento (HALLET, 2008). Esse fenômeno está associado ao recobrimento das partículas do solo por compostos orgânicos hidrofóbicos e, geralmente, o maior grau de repelência à água está intrinsecamente ligado à presença de maiores teores de carbono orgânico no solo (HALLET et al., 2001; ELLERBROCK et al., 2005; VOGELMANN et al., 2010, 2013b). Além disso, a repelência à água ou hidrofobicidade do solo pode ser observada em diferentes condições climáticas e originada por diversas substâncias orgânicas responsáveis por esse

fenômeno. A vegetação local pode contribuir com compostos orgânicos hidrofóbicos via deposição ou decomposição (ELLERBROCK et al., 2005; MATAIX-SOLERA et al., 2007). Os principais gêneros em que comumente tem se observado esse fenômeno são o *Pinus* e o *Eucalyptus*, principalmente devido à presença de grande quantidade de resinas, ceras e óleos aromáticos (ELLERBROCK et al., 2005, HALLET, 2008), gêneros esses que são de grande importância econômica florestal.

Os microrganismos, principalmente bactérias, podem liberar exsudatos hidrofóbicos (HALLET et al., 2001; SCHAUMANN et al., 2007), além de atuarem diretamente na decomposição do material orgânico. Alguns fungos possuem hifas e micélios, cuja superfície é recoberta por substâncias hidrofóbicas e, portanto, podem contribuir para o aumento do grau de hidrofobicidade (FEENEY et al., 2006, RILLIG et al., 2010). Outro fator importante na geração do caráter hidrofóbico é a ocorrência de incêndios e queimadas, que provocam o aquecimento do solo, originando, assim, uma camada superficial repelente à água em função das alterações nos compostos orgânicos presentes (GRANGED et al., 2011; VOGELMANN et al., 2012).

A composição granulométrica e a umidade do solo também podem estar associadas indiretamente à ocorrência da hidrofobicidade (WOCHE et al., 2005; DOERR et al., 2006). Outras evidências recentes apontam que o pH do solo também pode ser um fator-chave para o aumento da repelência à água, particularmente acima de 6,5 (BAYER e SCHAUMANN, 2007; MATAIX-SOLERA et al., 2007).

Assim, este trabalho tem por objetivo revisar e elencar os aspectos relacionados à origem dos compostos hidrofóbicos e o seu efeito na dinâmica da água no ambiente florestal, além de implicações no crescimento e desenvolvimento das árvores de florestas de eucalipto e pinus.

ORIGEM DOS COMPOSTOS IDROFÓBICOS

A hidrofobicidade do solo é observada em uma grande diversidade de solos e sob diferentes condições climáticas (DOERR et al., 2007). Várias podem ser as origens das substâncias orgânicas responsáveis pela repelência (Figura 1). Entretanto, geralmente atribui-se esse fenômeno da não interação solo-água, ao acúmulo e recobrimento das partículas minerais (argila, silte e areia) por compostos orgânicos hidrofóbicos derivados da atividade metabólica e decomposição de resíduos de plantas e microrganismos (BUCZKO et al., 2005, VOGELMANN et al., 2013b). Dessa forma, encontra-se geralmente correlacionada com o elevado conteúdo de matéria orgânica do solo, resultado da intensa produção, decomposição e ciclagem do material vegetal, condição comumente encontrada em ambientes florestais (MADSEN et al., 2011). Entre as principais substâncias sintetizadas pelas plantas, destacam-se ceras, lipídeos e resinas que naturalmente são compostos hidrófobos e no solo acabam contribuindo para a elevação da hidrofobicidade (ELLERBROCK et al., 2005). Existem também relatos da produção de exsudatos hidrófobos por raízes de plantas, hifas de fungos (RILLIG et al., 2010) e bactérias (ROPER, 2004; BAYER e SCHAUAMANN, 2007). Fungos e bactérias são os principais agentes decompositores, que apresentam seu crescimento potencializado em condições de elevada disponibilidade de material orgânico, condição comum em florestas de eucalipto e pinus (FEENEY et al., 2006; MADSEN et al., 2008; LARSEN et al., 2009). Outro fator importante na geração do caráter hidrofóbico é o aquecimento do solo provocado por queimadas e incêndios florestais, (MADSEN et al., 2011). Fox et al. (2007) e Dlapa et al. (2008) ressaltam que incêndios e queimadas provocam a elevação da temperatura na camada superficial, originada principalmente pela volatilização e condensação de substâncias orgânicas hidrofóbicas, formando uma camada superficial hidrófoba, a qual constitui um impedimento à infiltração de água e o consequente umedecimento do solo.

Ações antrópicas podem favorecer o aparecimento da hidrofobicidade em solos (PÉREZ et al., 1998; GERKE et al., 2001). Esses autores observaram elevação da hidrofobicidade em diferentes solos após o derramamento de poluentes, principalmente derivados do petróleo. Dessa forma, o homem pode ser um importante agente

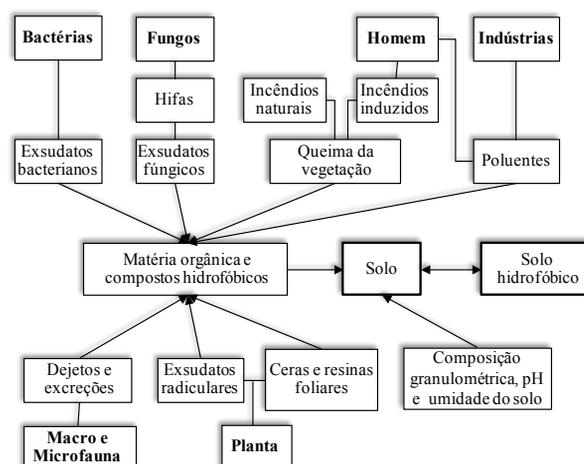


FIGURA 1: Principais agentes (negrito), processos e substâncias relacionadas com a origem e ocorrência de hidrofobicidade no solo.

FIGURE 1: The main agents (bold), processes and related substances with the origin and occurrence of soil hydrophobicity.

modificador da natureza, por provocar incêndios, causar poluição ou favorecer o acúmulo de resíduos sob a superfície do solo, passando a estimular indiretamente a manifestação da repelência do solo à água.

Vegetação

A vegetação local é uma fonte direta de compostos orgânicos hidrofóbicos, pois espécies florestais apresentam grande quantidade de resinas, ceras e lipídeos na superfície foliar. Esses compostos são bastante estáveis no solo e resultam em decomposição lenta e, dessa forma, acumulam-se na camada superficial do solo florestal, pois, ao contrário das áreas agrícolas, o solo não é constantemente revolvido (SCOTT et al., 2000; BUCZKO et al., 2005). Em áreas florestais ocorre o fornecimento contínuo de material orgânico e a deposição desse material, forma uma camada superficial de resíduos vegetais (WAHL, 2008; GLENN e FINLEY, 2010). Essa camada, comumente chamada de serrapilheira, é formada por tecidos de plantas e animais não decompostos e por produtos parcialmente decompostos, essenciais para o crescimento de fungos e bactérias, principais agentes decompositores no solo, mas que, ao mesmo tempo, podem produzir e liberar exsudatos ou produtos de sua decomposição com características

hidrofóbicas (RILLIG, 2005; MATAIX-SOLERA et al., 2007). Nas camadas mais inferiores existem relatos de plantas capazes de produzirem exsudatos radiculares hidrofóbicos, tornando a matriz do solo próxima às raízes hidrófoba, com o objetivo de aumentar a disponibilidade de nutrientes ou como forma de defesa contra a dessecação (HALLET et al., 2003; RILLIG, 2005).

Espécies arbóreas perenifólias são comumente associadas com a repelência à água, em especial as coníferas (WAHL, 2008; LARSEN et al., 2009). Segundo Buczko et al. (2005) e Doerr et al. (2005), material vegetal com uma considerável quantidade de resinas, ceras e óleos aromáticos, tal como ocorre nos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, geralmente estão associadas à presença de hidrofobicidade no solo (Tabela 1). Entretanto, Hallett et al. (2003) e Hallett (2008), sob outro ponto de vista, ressaltam que as substâncias hidrofóbicas produzidas pela vegetação são importantes mecanismos de defesa, ou seja, as ceras e lipídeos

nas folhas protegem contra a ação da radiação e contra a perda de água excessiva pelo processo de transpiração, além de reduzirem a perda evaporativa de água da camada superficial do solo. As resinas servem de proteção ao ataque de insetos e os exsudatos radiculares somados ao efeito do material hidrofóbico constituinte da serrapilheira, tornam o solo hidrofóbico, dificultando a germinação de sementes e o desenvolvimento de novas plantas que poderiam vir a competir por água, luz e nutrientes, sugerindo, assim, que a produção de substâncias hidrofóbicas poderia constituir um mecanismo alelopático. Porém, geralmente a hidrofobicidade tem sido vista apenas como fator negativo, no qual os fatores benéficos desse fenômeno não estão elucidados na literatura, carecendo de estudos específicos mais aprofundados para o seu esclarecimento.

Macro e microfauna

TABELA 1: Principais espécies de *Eucalyptus* e *Pinus* recentemente associadas com a hidrofobicidade do solo.

TABLE 1: Main *Eucalyptus* and *Pinus* species reported recently associated with soil hydrophobicity.

Espécie	Local	Autor (es)
<i>Eucalyptus baxteri</i>	Austrália	Doerr et al. (2004)
<i>Eucalyptus fastigata</i>	África do Sul; Austrália	Scott (2000); Granged et al. (2011)
<i>Eucalyptus globulus</i>	Portugal; Austrália; Espanha	Coelho et al. (2005); Thwaites et al. (2006) Rodriguez-Alerez et al. (2007)
<i>Eucalyptus grandis</i>	África do Sul	Scott (2000)
<i>Eucalyptus ovata</i>	Austrália	Doerr et al. (2004)
<i>Eucalyptus radiata</i>	Austrália	Granged et al. (2011)
<i>Eucalyptus sieberi</i>	Austrália	Doerr et al. (2004)
<i>Pinus contorta</i>	Estados Unidos	MacDonald e Huffman (2004)
<i>Pinus densiflora</i>	Japão	Kawamoto et al. (2007)
<i>Pinus edulis</i>	Estados Unidos	Robinson et al. (2010)
<i>Pinus elliottii</i>	África do Sul	Scott (2000)
<i>Pinus halepensis</i>	Espanha; Israel	Cerdá e Doerr (2007); Mataix-Solera et al. (2012)
<i>Pinus nigra</i>	Alemanha	Gerke et al. (2001)
<i>Pinus patula</i>	Colômbia	Jaramillo (2006)
<i>Pinus pinaster</i>	Portugal; Espanha	Coelho et al. (2005); Rodriguez-Alerez et al. (2007)
<i>Pinus ponderosa</i>	Estados Unidos	MacDonald e Huffman (2004); Larsen et al. (2009)
<i>Pinus radiata</i>	África do Sul	Scott (2000)
<i>Pinus sylvestris</i>	Alemanha; Eslováquia	Buczko et al. (2005); Dlapa et al. (2008)
<i>Pinus taeda</i>	Brasil	Hansel et al. (2008); Cambronero et al. (2011)
<i>Pinus uncinata</i>	Dinamarca	Wahl (2008)

Acredita-se que a fauna apresente uma contribuição significativa para o aumento da hidrofobicidade dos solos devido à produção de grande quantidade e diversidade de excrementos pelos organismos do solo, que variam desde esterco e urina até excreções menos expressivas como a saliva (BRONICK e LAL, 2005). Deve-se considerar também o papel desses organismos como modificadores do ambiente em que vivem, atuando na decomposição e transformação dos compostos (JEGOU et al., 2001). Tais organismos afetam também a distribuição, o tempo de estabilização e a decomposição dos resíduos, apresentando ainda impactos diretos e indiretos na formação da estrutura do solo e na mudança na microtopografia do terreno (CHAUVAT, 2007; RAWLINS et al., 2007).

As minhocas, por exemplo, em um pequeno período de tempo, podem transformar e estabilizar temporariamente grande quantidade de resíduos (JEGOU et al., 2001; FALL et al., 2001). A grande maioria dos insetos modifica a suscetibilidade à decomposição dos resíduos, fragmentando partículas de material orgânico em partículas de menores tamanhos e, dessa forma, aceleram o processo de degradação (CHAUVAT, 2007; RAWLINS et al., 2007). Coleópteros e formigas costumam enterrar material vegetal em seus ninhos, nos quais, mais tarde, esse é consumido diretamente ou utilizado como alimento por fungos e bactérias (BRONICK e LAL, 2005). Dessa forma, em ambientes florestais encontram-se normalmente zonas de elevada hidrofobicidade próximas às concentrações de populações de cupins e coleópteros principalmente. Em pastagens naturais do sul do Brasil, áreas onde recentemente têm sido implantados vários povoamentos de eucalipto e pinus, é comum encontrar grande quantidade de cupinzeiros e, nestes, os cupins produzem secreções salivares capazes de induzir a hidrofobicidade no solo por grande período de tempo (FALL et al., 2001). Por outro lado, Chauvat (2007) e Bronick e Lal (2005) ressaltam que muitos organismos cavam galerias que facilitam a infiltração de água no solo, agindo como ferramentas capazes de reduzir os efeitos da hidrofobicidade no solo.

Fungos e bactérias

Estudos de Doerr et al. (2007), avaliando a relação do crescimento de fungos e bactérias com a presença de hidrofobicidade, revelaram que muitos dos compostos orgânicos potencialmente hidrofóbicos

podem ser oriundos do metabolismo de certas espécies de fungos e bactérias decompositores de materiais orgânicos. Em estudos anteriores, Jaramillo (2006) e Lin et al. (2006) já haviam verificado a relação da repelência à água com a atividade de fungos e microrganismos no solo e relatam que esses fungos podem estar associados com alguma vegetação específica como, por exemplo, espécies do gênero *Basidiomycea*, comuns em pastagens e plantios de pinus, os quais participam da decomposição da lignina presente na serrapilheira. Segundo Hallet et al. (2006) e Feeney et al. (2006), muitos fungos possuem hifas e micélios, cuja superfície é recoberta por substâncias hidrofóbicas e, dessa forma, podem contribuir para a elevação do grau de hidrofobicidade na área em que se desenvolvem.

Uma grande variedade de fungos e microrganismos tem sido associada com a repelência à água, como, por exemplo, *Penicillium nigricans* e *Aspergillus sydowi* (RILLIG, 2005; RILLIG et al., 2010), *Coriolus versicolor* e *Phanerochaete chrysosporium* (HALLET et al., 2006) ou Actinomicetos (ROPER, 2004). Buscando avaliar a população microbiana e sua relação com propriedades físicas dos solos, Lin et al. (2006) verificaram a redução do crescimento de florestas de *Casuarina equisetifolia* nas regiões em que existia intenso crescimento de fungos, o qual gerou zonas de elevada hidrofobicidade no solo. Nessas zonas repelentes, os autores encontraram grande quantidade de micélio da espécie de fungo *Basidiomycea*, que decompõe especialmente lignina e é muito comum em florestas de eucalipto e pinus.

As bactérias também exercem um papel importante, já que essas ao lado dos fungos são os principais decompositores dos resíduos vegetais acumulados na superfície dos solos (CHAPPELL e EVANGELOU, 2002; SCHAUMANN et al., 2007). Rillig et al. (2010) observaram, em solos arenosos, o aumento da repelência à água em regiões com elevado crescimento microbiano e concluíram que esse aumento foi causado pelas substâncias poliméricas extracelulares, ou também chamadas de biofilmes bacterianos, liberados pela população de bactérias. Os biofilmes variam muito em sua composição e, portanto, em suas propriedades químicas e físicas (SCHAUMANN et al., 2007). Sua estrutura consiste de uma mistura de polissacarídeos, proteínas, ácidos nucleicos e lipídios, mas a composição exata é definida pelo ambiente em que a bactéria produtora do biofilme se

desenvolve (RILLIG, 2005; FEENEY et al., 2006),

Incêndios florestais

O fogo incide sobre a vegetação desde tempos remotos e ainda é utilizado como ferramenta de manejo na abertura de novas áreas agrícolas, no controle de pragas e plantas daninhas e como forma de manejo de pastagens (JONHSON et al. 2005). Entretanto, a ocorrência de incêndios e queimadas provoca o aquecimento do solo, favorecendo a formação de uma camada superficial repelente à água devido a alterações nos compostos orgânicos oriundos do processo de decomposição da vegetação local (GRANGED et al., 2011) associado à redução da umidade do solo nessa camada (DOERR et al., 2005). Com isso, o calor incidente sobre as substâncias orgânicas pode ser solubilizado e se concentrar na superfície do solo. O processo de solubilização transforma as substâncias orgânicas em outros produtos, principalmente os lipídeos, os quais passam a recobrir as partículas do solo, provocando um selamento da camada superficial, o que pode vir a constituir um impedimento à infiltração de água e ao consequente umedecimento do solo (FOX et al., 2007). As substâncias hidrofóbicas formadas durante a queima podem se tornar fortemente cimentadas na camada subsuperficial do solo, resultando na formação de camadas repelentes à água com elevada persistência temporal e, assim, elevando o escoamento superficial e reduzindo a taxa de infiltração no solo após a queima (MADSEN et al, 2008; LARSEN et al, 2009).

Alterações no solo como a redução da sortividade em decorrência de queimadas já foram relatadas em diversos ecossistemas, incluindo: florestas de *Pinus ponderosa* e *Pinus contorta* nos Estados Unidos (MACDONALD e HUFFMAN, 2004) e *Pinus halepensis* na Espanha (CERDÁ e DOERR, 2007; MATAIX-SOLERA et al., 2007), florestas de *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus* em Portugal (RODRIGUEZ-ALEREZ et al., 2007) e *Eucalyptus sieberi*, *Eucalyptus ovata* e *Eucalyptus baxteri* na Austrália (DOERR et al., 2004). Fox et al. (2007), estudando solos de floresta submetidos a incêndios acrescenta que, associado ao aumento da hidrofobicidade, pode ocorrer a diminuição do conteúdo de matéria orgânica do solo e aumento da erosão superficial.

Estudando florestas de *Juniperus osteosperma* e *Pinus* sp., Madsen et al. (2011) observaram que os padrões de repelência à água do

solo após a queima foram altamente correlacionados com a estrutura do dossel da floresta, a umidade do solo e com o processo de revegetação. Nesse estudo, elevada hidrofobicidade foi encontrada até um pouco além da borda da copa, enquanto os maiores valores ficaram limitados até a borda da copa das árvores, sendo que essa hidrofobicidade perdurou por mais de 2 anos após o incêndio (Figura 2). Na zona hidrofóbica, os autores observaram que a recuperação da vegetação foi significativamente menor, limitando o estabelecimento de plântulas, ao contrário das regiões além do limite do dossel, nas quais a repelência à água do solo era menor ou inexistente. Madsen et al. (2008) também constataram após a ocorrência de queimadas em áreas de floresta de *Pinus* sp. que a repelência à água no solo elevou-se apenas na região imediatamente abaixo da copa das árvores. No mesmo estudo, eles verificaram que a condutividade hidráulica não saturada continuou a aumentar ao longo de um gradiente espacial, até duas

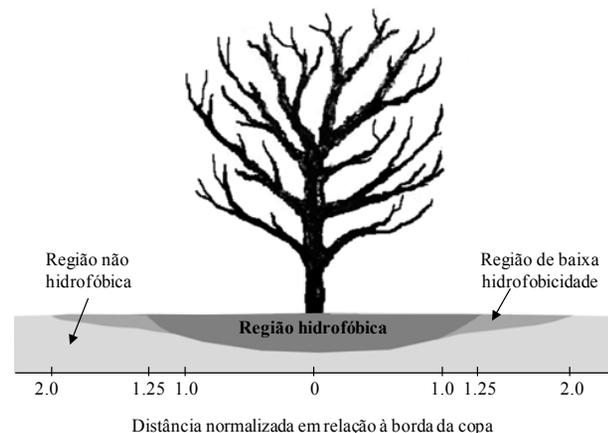


FIGURA 2: Diagrama esquemático do dossel de uma árvore após ocorrência de um incêndio, evidenciando as áreas hidrofóbicas, de baixa hidrofobicidade e não hidrofóbicas (Adaptado de: Madsen et al., 2011; reproduzido/adaptado com permissão de Soil Science Society of American Journal).

FIGURE 2: Schematic diagram of a tree canopy after burning, showing areas with high and low hydrophobicity (Adapted from: Madsen et al., 2011; reproduced/adapted with permission from Soil Science Society of American Journal).

vezes o raio da copa. Isso corrobora com Vogelmann et al., 2012, os quais concluíram que a gravidade e a extensão da região hidrofóbica são variáveis e estão diretamente ligadas às espécies presentes e principalmente à massa vegetal queimada.

PROPRIEDADES CONDICIONANTES DO CARÁTER HIDROFÓBICO

A repelência à água no solo é decorrente, em parte, da acumulação de certos tipos de compostos orgânicos hidrofóbicos, os quais não apresentam um grau de alteração muito avançado e não correspondem ao húmus propriamente dito (VOGELMANN et al., 2010). Logo que são produzidos, os compostos hidrofóbicos distribuem-se no solo e imprimem o caráter de repelência (KAWAMOTO et al., 2007). Os compostos vão recobrimo total ou parcialmente as partículas, agregados e paredes dos poros, transmitindo ao material o comportamento hidrofóbico (VOGELMANN et al., 2012).

Porém, a hidrofobicidade de um solo não é estática e apresenta variação espacial e temporal, sendo que o conteúdo de água do solo é uma das variáveis que mais influencia na sua ocorrência (GERKE et al., 2001; RODRIGUES-ALLERES et al., 2007). Esses compostos hidrofóbicos são fortemente hidrófilos em ambiente úmido, mas, abaixo de um limite crítico de umidade, as superfícies hidrófilas agrupam-se fortemente umas com as outras, envolvendo parcialmente ou completamente as partículas ou até os agregados do solo, deixando uma superfície de exposição hidrofóbica (DOERR et al., 2005). Isso também é relatado por Robinson et al. (2010) e Vogelmann et al. (2013a) que concluíram que um solo é propenso a apresentar hidrofobicidade quando abaixo de um nível crítico de umidade, sendo que seu comportamento pode alterar-se abruptamente, a partir da redução do conteúdo de água, de molhável para não molhável. Porém, um prolongado período de molhamento pode novamente reverter esse comportamento e o solo pode outra vez tornar-se hidrofílico; dessa forma, solos hidrofóbicos recuperam sua molhabilidade (DOERR et al., 2007).

A distribuição da matéria orgânica acima da superfície das partículas do solo desempenha um papel-chave quanto à facilidade com que o solo se torna repelente à água (DOERR et al., 2006). Woche et al. (2005) e Vogelmann et al. (2010, 2012) citam casos de repelência à água constatados em solos arenosos, em decorrência da maior facilidade de

recobrimento da areia por substâncias hidrofóbicas devido à baixa superfície específica desses minerais, pois uma pequena quantidade de compostos hidrofóbicos pode ser capaz de imprimir elevado grau de hidrofobicidade.

Recentemente, o estudo de Bayer e Schaumann (2007) mudou o enfoque para outros fatores que afetam a repelência da água, os quais encontraram correlação positiva entre alterações do pH e o índice de hidrofobicidade e concluíram que o pH, particularmente acima de 6,5, promove a redução da repelência à água. Isso corrobora com o descrito por Mataix-Solera et al. (2007) que investigaram a ocorrência de hidrofobicidade em solos sob quatro espécies arbóreas e verificaram correlação significativa com o pH do solo.

EFEITOS DA HIDROFOBICIDADE

Implicações hidrológicas

A existência de hidrofobicidade exige uma atenção diferenciada, principalmente em relação ao uso e manejo do solo (WANG et al., 2004). Como efeito primário, Hallet (2008) cita a redução da taxa de infiltração de água e dessa forma, a quantidade de água disponível será diminuída, afetando a germinação de sementes, o crescimento e o desenvolvimento das florestas. Além disso, em decorrência da menor taxa de infiltração pode ocorrer o aumento do escoamento superficial, principalmente em áreas declivosas, elevando os riscos de perda de solo por erosão (CERDÁ e DOERR et al., 2007; GLENN e FINLEY, 2010).

Solos hidrofóbicos apresentam ainda maior risco em relação às contaminações por poluentes, principalmente quando esses poluentes forem compostos polares, pois podem permanecer concentrados na camada superficial em função da redução da taxa de infiltração pela ação de compostos hidrofóbicos, sendo facilmente carregados pela chuva em áreas declivosas, acumulando-se em depressões ou em mananciais hídricos (DOERR et al., 2007; MÜLLER e DEURER, 2011). A ocorrência de erosão hídrica devido ao maior escoamento superficial e à menor infiltração de água também pode ser potencializada (GLENN e FINLEY, 2010; VOGELMANN et al., 2013b).

A redução da infiltração ainda pode afetar indiretamente a emergência das plantas e causar a inatividade de fertilizantes (MÜLLER e DEURER, 2011) e agrotóxicos que necessitem ser solubilizados

para agirem corretamente (HALLET, 2008). No entanto, apesar da evidente redução da infiltração causada por compostos hidrofóbicos, em alguns casos, a distribuição desses compostos nas paredes dos agregados ou poros pode induzir a ocorrência de fluxo preferencial no solo, fazendo com que ocorram perdas de solutos por lixiviação ou contaminações de camadas subsuperficiais, pois nesse caso, a reação dos poluentes com a matriz do solo, que seria capaz de reter ou atenuar o efeito contaminante do poluente, é dificultada ou não ocorre e os poluentes são lixiviados para camadas profundas, dificultando sua degradação e os processos de biorremediação (PÉREZ et al., 1998, GERKE et al., 2001).

Investigações realizadas em solos arenosos na Alemanha demonstraram que, em solos florestados com coníferas, a capacidade de infiltração do solo foi reduzida devido ao efeito de compostos hidrofóbicos presentes nos resíduos orgânicos dessas espécies (BUCZKO et al., 2005). Ainda nesse estudo, foram encontradas na camada superior, de 0,00 a 0,10 m, amostras extremamente hidrofóbicas, mas a persistência da repelência diminuiu com o aumento da profundidade do solo. Isso corrobora com o descrito por Vogelmann et al. (2010), que encontraram maiores índices de hidrofobicidade no horizonte superficial em diferentes solos no sul do Brasil e atribuíram isso ao maior teor de carbono orgânico encontrado nas camadas mais superficiais do solo. Essas mudanças influenciam, sobretudo, a disponibilidade e a capacidade de armazenamento da água do solo, afetando consideravelmente o crescimento e desenvolvimento da vegetação (BUCZKO et al., 2005). Em solos sob uso agrícola ou florestal, o uso e o manejo do solo podem ter influência significativa sobre as propriedades hidráulicas (GLENN e FINLEY, 2010; MÜLLER e DEURER, 2011). Dessa forma, práticas de manejo do solo são capazes de alterar a infiltração, o escoamento superficial, a retenção de água e o risco de inundações de áreas mais baixas (JARAMILLO, 2006).

Processos erosivos

Em povoamentos de *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus* em solos de textura média (640 g kg⁻¹ de areia) na Colômbia, Jaramillo (2006) encontrou solos hidrofóbicos em ambos os casos. O autor descreve que a serrapilheira, além de apresentar efeito benéfico para o solo, pois, ao cobrir o solo, permite preservá-lo do impacto da água da chuva;

ao ser decomposta, pode vir a produzir substâncias orgânicas que conferem ao solo repelência à água, reduzindo as taxas de infiltração e, conseqüentemente, aumenta o escoamento superficial e a possibilidade de desgastes do solo pelo processo erosivo. Isso contraria o que geralmente se preconiza, pois os solos arenosos normalmente apresentam elevada capacidade de infiltração (CERDÁ e DOERR, 2007). Entretanto, nesse caso, a infiltração foi reduzida drasticamente pela presença dos compostos hidrófobos na camada superficial. Nos povoamentos florestais, após a colheita, verifica-se um significativo aumento da taxa de decomposição da serrapilheira e a exposição desses ao efeito da gota da chuva tornam os solos hidrofóbicos ainda mais suscetíveis à erosão (COELHO et al., 2005; CERDÁ e DOERR et al., 2007). Dessa forma, estudos recomendam evitar o corte raso de toda a área ou abreviar ao máximo o tempo entre a colheita e o novo plantio, principalmente em áreas de maior declive (JARAMILLO, 2004).

Experimentos com povoamentos de diferentes idades de *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*, em áreas com declividades compreendidas entre 14 e 22%, revelaram que a hidrofobicidade é um fator ativo na erosão dos solos (SHAKESBY et al., 2000). Nesse estudo, verificou-se um comportamento diferenciado do processo erosivo, em que o desprendimento de partículas por salpicamento, avaliado em ensaios com simulador de chuva em declividade horizontal de 15°, foram 85% e 59% maiores no solo das áreas de *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*. Os autores relatam que o solo hidrofílico umedeceu-se rapidamente e o umedecimento da superfície reduziu a desagregação e o salpico das partículas, já o hidrofóbico permaneceu por mais tempo seco e, portanto, resultou em maior tempo de desprendimento de partículas pelo impacto das gotas, associado à reduzida infiltração de água, beneficiando a potencialização do processo erosivo. Coelho et al. (2005) e Cerdá e Doerr (2007) também comentam que hidrofobicidade do solo reduz sua afinidade pela água de tal maneira que os solos resistem ao umedecimento por períodos que variam de segundos a semanas. Nesse sentido, Jaramillo (2004; 2006) e Coelho et al. (2005) destacam que esse fenômeno leva ao aumento do fluxo subsuperficial, perdas de solo por erosão e padrões de infiltração não uniformes, mas, segundo Wang et al. (2004), é a redução na capacidade de infiltração de água no solo o principal agravante, sendo responsável pelo

processo de erosão acelerada do solo em plantios florestais.

Desenvolvimento das plantas e produção florestal

No estudo de Madsen et al. (2011), a distribuição das zonas de elevada repelência à água após a queima da vegetação foi altamente correlacionada com a estrutura do dossel da floresta de *Pinus* sp. Os autores observaram na região próxima à copa, associada com a elevação da hidrofobicidade, uma drástica redução na capacidade de infiltração e condutividade hidráulica do solo não saturado e, conseqüentemente, uma redução da disponibilidade hídrica que, indiretamente, afetou significativamente o processo de revegetação e recuperação da vegetação remanescente, limitando o estabelecimento de novas plântulas de *Pinus* sp. Além disso, em decorrência da menor taxa de infiltração pode ocorrer aumento do escoamento superficial da água, principalmente em áreas declivosas, acelerando os riscos de erosão (GLENN e FINLEY, 2010). Essa redução da infiltração ainda pode afetar a germinação de sementes e causar a inatividade de fertilizantes e alguns agrotóxicos tornando as práticas culturais onerosas e pouco eficientes (DOERR et al., 2006; GERKE et al., 2001). Similarmente, Madsen et al. (2008) e Robinson et al. (2010) citam também que em áreas de solos hidrofóbicos é comum o processo erosivo ser mais intensificado, promovendo, além de perda de solo a perda de nutrientes, ocasionando a redução da fertilidade natural do sítio de produção, refletindo-se, por sua vez, no retardamento do crescimento e desenvolvimento das árvores com significativas quedas na produção florestal.

Alguns estudos relatam que a hidrofobicidade é um problema crítico na implantação de florestas. Nesse âmbito, Jaramillo (2006) e Madsen et al. (2011) relatam dificuldades de implantação de novos povoamentos em área anteriormente vegetada com pinus devido à elevada hidrofobicidade do solo, a qual perdura mesmo após a colheita do povoamento anterior e é responsável pela produção dos compostos hidrófobos, que se acumularam no solo. Nessas áreas foi observado elevado índice de mortalidade de mudas e desenvolvimento aquém do esperado e o autor relacionou esse comportamento à baixa disponibilidade hídrica que conseqüentemente afetou processos fisiológicos e a absorção dos nutrientes aplicados para garantir o desenvolvimento adequado das mudas, corroborando com o descrito

anteriormente por Jaramillo (2004).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As descobertas e avanços, principalmente após 1980, foram fundamentais para o entendimento e compreensão dos impactos da repelência à água em processos físicos e hidrogeomorfológicos. Na última década, tornou-se evidente que a hidrofobicidade do solo não é apenas um fato que estimulou a curiosidade de estudiosos, mas trata-se de um fenômeno extremamente importante para as Ciências Florestais e Ciência do Solo. A grande extensão e os constantes relatos de sua ocorrência em diversos países contribuíram para que a relevância do assunto fosse adequadamente ponderada, passando a receber a referida atenção no meio científico.

Embora ainda controverso, a maioria dos estudos aponta que moléculas hidrófobas não apresentam uma única origem, mas é resultado de um conjunto de interações entre a vegetação, propriedades físicas e químicas do solo, animais, microrganismos e ocorrência de queimadas, evoluindo em períodos de seca e, algumas vezes, desaparecendo durante os períodos úmidos e chuvosos. Recentemente, exsudatos radiculares e exsudatos de bactérias e fungos também foram reconhecidos como possíveis fontes de compostos hidrofóbicos nos solos florestais. Qualquer composto hidrófobo, independente de sua origem, pode revestir partículas individuais ou formar um revestimento intersticial entre os agregados do solo e, dessa forma, distribuir-se na matriz do solo, tornando-o hidrofóbico.

Assim, esse fenômeno pode afetar diretamente a entrada de água através da superfície do solo e o seu conseqüente movimento no interior do seu perfil. Alterações na sortividade, elevado escoamento superficial e predisposição à ocorrência de fluxo preferencial são os principais efeitos hidrológicos da repelência à água e ocorrem desde a microescala até a escala de bacias hidrográficas. No entanto, os reais efeitos da hidrofobicidade em nível de bacias hidrográficas não estão claramente definidos, porém, acredita-se que seus efeitos tenham reflexos diretos na dinâmica da água, provocando o aumento do escoamento superficial, alterando o pico de fluxo, fluxo de água subsuperficial, percolação e taxas de sedimentação e, além disso, intensificando o processo erosivo. Atualmente é reconhecido que esse comportamento não deve ser avaliado somente

em função da avaliação da hidrofobicidade, mas também devem ser considerados outros fatores que estão associados indiretamente à manifestação do mesmo, como o tipo de vegetação, uso e estrutura do solo, condições climáticas em uma escala espacial e temporal. Essa interpretação mais complexa representa um importante avanço no estudo dos solos hidrofóbicos, pois são imprescindíveis pesquisas que contemplem holisticamente as interações entre os fatores que direcionam e favorecem a manifestação da repelência à água nos solos agrícolas e florestais.

Nesse sentido, estratégias de mitigação do problema também necessitam ser desenvolvidas, principalmente em função do crescente e constante aumento das áreas de plantios florestais. Em áreas agrícolas algumas alternativas de controle ou redução, mesmo que momentâneas têm sido estudadas, mas é no ambiente florestal, principalmente em área de cultivo de *Pinus* e *Eucalyptus*, onde comumente se manifesta elevada hidrofobicidade, que há maior carência de trabalhos concisos.

A disponibilidade hídrica no solo para o desenvolvimento das culturas também é um fator preocupante e atualmente já assolam muitos países e, provavelmente, deverão aumentar significativamente nos próximos anos, principalmente em função das mudanças climáticas globais, que apontam para a elevação da temperatura e reduções da precipitação em alguns locais, tornando a água um recurso ainda mais valioso. Assim, os impactos da hidrofobicidade na produção florestal são cada vez mais presentes e evidentes em diversos locais do globo. Portanto, estudos relacionados à mitigação da hidrofobicidade são imprescindíveis para maximizar o uso e benefícios desse importante recurso que a cada dia torna-se mais escasso, a água.

Necessidades de pesquisas futuras

Os estudos relacionados à hidrofobicidade no solo ainda carecem de investigações e aprofundamentos em vários pontos críticos. Contudo, como se buscou explorar nesse estudo, é na área florestal que aparentemente os estudos têm avançado menos. O primeiro ponto crítico a ser elencado é em relação às interações entre a vegetação, biologia do solo e propriedades químicas e físicas do solo, as quais já foram estudadas isoladamente, mas é necessário entrelaçar esse conhecimento, procurando investigar e identificar os fatores-chave causadores da hidrofobicidade nos solos. Nesse sentido, observa-se que, devido à

heterogeneidade de condições e prováveis processos que estão interligados à ocorrência do fenômeno, devem buscar informações em diferentes campos da Ciência do Solo com pesquisas conjuntas e interdisciplinares, as quais levarão a avanços na compreensão do comportamento dos agentes e processos ligados à hidrofobicidade.

Outro ponto a ser considerado está ligado à capacidade de avaliar, compreender e prever as variações temporais e espaciais do fenômeno no campo em função de mudanças nas condições ambientais. Isso foi e é tema de muitos estudos, que majoritariamente estão focados em desvendar a relação entre o conteúdo de água do solo e sua expressão de repelência à água, entretanto, perduram os resultados conflitantes. Talvez as respostas não estejam apenas na umidade do solo, mas em uma rede de processos e fenômenos atrelados ou desencadeados por essa propriedade e que provavelmente são a fonte de variação entre os estudos. Mesmo após inúmeros trabalhos, ainda perdura a questão: o que torna a hidrofobicidade do solo um fenômeno transitório? Compreender as complexas interações entre os diferentes solos e os inúmeros fatores ambientais que afetam o caráter hidrófobo pode ajudar na compreensão e, conseqüentemente, mitigação dos seus efeitos nocivos.

Avanços em relação à necessidade de avaliar e interpretar observações feitas em diferentes escalas são necessários, desenvolvendo formas de aplicação dos estudos e conhecimentos considerando o meio complexo e heterogêneo que é o solo, em condições naturais e na escala adequada. Incluem-se aqui estudos e análises detalhadas do processo desenvolvido não somente em laboratório, mas também acompanhadas em experimentos de campo de longo prazo sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo, vegetação, classes de solo e condições climáticas. A quantificação dos vários efeitos hidrológicos da repelência à água em escalas de campo é talvez o ponto ainda menos elucidado. Nesse sentido, é necessário desenvolver métodos capazes de avaliar os efeitos do fenômeno nas diferentes escalas, permitindo que os efeitos de repelência à água possam ser contabilizados de forma eficaz e que, a partir disso, se possa mensurar a magnitude dos efeitos da hidrofobicidade sobre a dinâmica da água no solo e suas repercussões no desenvolvimento das florestas. Isso se torna extremamente relevante principalmente em virtude das constantes variações climáticas ao se buscar

prever futuros efeitos hidrológicos de repelência do solo.

Em relação à presença e distribuição das espécies de organismos do solo e seus efeitos na ocorrência da repelência à água, pode-se ressaltar que esses ainda foram muito incipientes, fazendo-se necessárias pesquisas visando elucidar o real efeito dos organismos na produção de compostos hidrofóbicos, principalmente pelo grande número e diversidade de espécies que habitam os solos nos mais diferentes locais. Dessa forma, ainda permanecem sem resposta adequadas questões como: quais as espécies promovem a elevação da hidrofobicidade? Quais processos e mecanismos desses organismos alteram a hidrofobicidade? Ou mais intrigantemente, fica contraditoriamente outra dúvida, qual organismo pode efetivamente reduzir a hidrofobicidade? Isso poderia ser uma importante estratégia de redução, controle e até prevenção da ocorrência de hidrofobicidade em ambientes florestais.

É também necessário quebrar alguns paradigmas, principalmente a relação de efeito negativo com a ocorrência da hidrofobicidade do solo, pois esse pensamento tem norteado por várias décadas os estudos nessa área. Entretanto, pesquisas recentes têm relatado aspectos positivos da ocorrência desse fenômeno no solo como o aumento da estabilidade de agregados e a redução das taxas de evaporativas, importante em situações de estresse ou de baixa pluviosidade. Todos esses aspectos demonstraram que ainda é necessário explorar e investigar qual é a importância ecológica da repelência à água no solo para, quem sabe, usá-la de maneira benéfica, estimulando e elevando a produtividade de sistemas florestais e agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF: ano base 2010**. Brasília, 130p. 2011. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11/ABRAF11-BR.pdf>>. Acesso em: 20 de março de 2011.
- BAYER, J. V.; SCHAUMANN, G. E. Development of soil water repellency in the course of isothermal drying and upon pH changes in two urban soils. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 21, n. 17, p. 2266–2275, 2007.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 3-22. 2005.
- BUCZKO, U.; BENS, O.; HÜTTL, R. F. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). **Geoderma**, Amsterdam, v. 126, n. 3-4, p. 317-336, 2005.
- CAMBRONERO, T. C. et al. Influência da concentração de extratos hidrofóbicos na repelência à água em solos arenosos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 65, p. 01-08, 2011.
- CERDÁ, A.; DOERR, S. H. Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 21, n. 17, p. 2325–2336. 2007.
- CHAPPELL, M. A.; EVANGELOU, V. P. Surface chemistry and function of microbial biofilms. **Advances in Agronomy**. Newark. v. 76, p. 163-199. 2002.
- CHAUVAT, M. Humus structure during a spruce forest rotation: quantitative changes and relationship to soil biota. **European Journal of Soil Science**. Oxford, v. 58, n. 3, p. 625-631. 2007.
- COELHO, C. O. A. et al. The impact of soil water repellency on soil hydrological and erosional processes under Eucalyptus and evergreen Quercus forest in the Western Mediterranean. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 43, n. 3, p. 309–318. 2005.
- DLAPA, P. et al. Application of thermal analyses to elucidate water repellency changes in heated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 1, p. 1-10. 2008.
- DOERR, S. H. et al. Heating effects on water repellency in Australian eucalypt forest soils and their value in estimating wildfire soil temperatures. **International Journal of Wildland Fire**, Australia, v. 13, n. 2, p. 157-163, 2004.
- DOERR, S. H. et al. Extraction of compounds associates with water repellency in sandy soils of different origin. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 43, n. 3, p. 225-237, 2005.
- DOERR, S. H. et al. Water repellence of soils: new insights and emerging research needs. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 21, n. 17, p. 2223-2228, 2007.
- DOERR, S. H. et al. Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land use types in a humid temperate climate. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 57, n. 5, p. 741-754, 2006.
- ELLERBROCK, R. H. et al. Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three

- forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 1, p. 57-66, 2005.
- FALL, S.; BRAUMAN, A.; CHOTTE, J. L. Comparative distribution of organic matter in particle and aggregate size fractions in the mounds of termites with different feeding habits in Senegal: *Cubitermes niokoloensis* and *Macrotermes bellicosus*. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 17, n. 2, p. 131-140, 2001.
- FEENEY, D. S. et al. Impact of fungal and bacterial biocides on microbial induced water repellency in arable soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, n. 11, p. 72-80, 2006.
- FOX, D. M.; DARBOUX, F.; CARREGA, P. Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 21, n. 17, p. 2377-2384, July, 2007.
- GERKE, H. H et al. Spatial variability of potential water repellency in a lignitic mine soil afforested with *Pinus nigra*. **Geoderma**, Amsterdam, v. 102, n. 3-4, p. 255-274. 2001.
- GLENN, N. F.; FINLEY C. D. Fire and vegetation type effects on soil hydrophobicity and infiltration in the sagebrush-steppe: I. Field analysis. **Journal of Arid Environments**. London, v. 74, n.6, p. 653-659. 2010.
- GRANGED, A. J. P. et al. Short-term effects of experimental fire for a soil under eucalyptus forest (SE Australia). **Geoderma**, Amsterdam, v. 167-168, n. 11, p. 125-134, 2011.
- HALLETT, P. D. A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency – a Review. **Soil & Water Research**, Slezská, v. 3, n. 1, p. 21-29, 2008.
- HALLETT, P. D.; GORDON, D. C.; BENGOUGH, A. G. Plant influence on rhizosphere hydraulic properties: direct measurements using a miniaturized infiltrometer. **New Phytologist**, Lancaster, v. 157, n. 3, p. 597-603, 2003.
- HALLETT, P. D.; WHITE, N. A.; RITZ, K. Impact of basidiomycete fungi on the wettability of soil contaminated with a hydrophobic polycyclic aromatic hydrocarbon. **Biologia**, Bratislava, v. 61, n. 19, p. 334-338, 2006.
- HANSEL, F. A. et al. Comparison of two alkaline treatments in the extraction of organic compounds associated with water repellency in soil under *Pinus taeda*. **Geoderma**, Amsterdam, v. 148, n. 2, p. 167-172, 2008.
- JARAMILLO, J. D. F. **Repelencia al agua en suelos: con énfasis en Andisoles de Antioquia**. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2004. 197 p.
- JARAMILLO, J. D. F. Repelencia al agua en suelos: una síntesis. **Revista Académica Colombiana de Ciencia**, Medellín, v. 30, n. 115, p. 215-232, 2006.
- JÉGOU, D. et al. Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 17, n. 2, p. 165-174. 2001.
- JOHNSON, M. S. et al. Spatial and temporal variability of soil water repellency of Amazonian pastures. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 43, n. 1, p. 319-326, 2005.
- KAWAMOTO, K. et al. Water repellency of aggregate size fractions of a volcanic ash soil. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 71, n. 6, p. 1658-1666. 2007.
- LARSEN, I. J. et al. Causes of post-fire runoff and erosion: the roles of soil water repellency, surface cover, and soil sealing. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 4, p. 1393-1407. 2009.
- LIN, C. Y. et al. Water repellency of Casuarina windbreaks (*Casuarina equisetifolia* Forst.) caused by fungi in central Taiwan. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 283-292, 2006.
- MACDONALD, L. H.; HUFFMAN, E. L. Post-fire soil water repellency: persistence and soil moisture thresholds. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 68, n. 6, p. 1729-1734. 2004.
- MADSEN, M. D.; CHANDLER, D. G.; BELNAP, J. Spatial gradients in ecohydrologic properties within a pinyon-juniper ecosystem. **Ecohydrology**. Malden, v. 1, n. 4, p. 349-360. 2008.
- MADSEN, M. D. et al. Soil Water Repellency within a Burned Pinon-Juniper Woodland: Spatial Distribution, Severity, and Ecohydrologic Implications. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 75, p. 1543-1553. 2011.
- MATAIX-SOLERA J. et al. Soil properties as key factors controlling water repellency in fire-affected areas: Evidences from burned sites in Spain and Israel. **Catena**, Amsterdam, v. 88, n. 1, p. 45-56, 2012.
- MATAIX-SOLERA, J. et al. Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid Mediterranean environment. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 21, n. 17, p. 2300-2309, 2007.
- MÜLLER, K.; DEURER, M. Review of the remediation strategies for soil water repellency. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. Zürich,

- v. 144, n. 1, p. 208-221. 2011.
- PÉREZ, D. V.; SIMÃO, S. M.; SALATINO, A. Identificação e caracterização da repelência à água em alguns solos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 173-179, 1998.
- RAWLINS, A. J. et al. Stabilisation of soil organic matter in invertebrate faecal pellets through leaf litter grazing. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 39, n. 5, p. 1202-1205. 2007.
- RILLIG, M. C. A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency. **Pedobiologia**, Jena, v. 49, n. 5, p. 395-399. 2005.
- RILLIG, M. C. et al. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 42, n. 7, p. 1189-1191. 2010.
- ROBINSON, D. A. et al. Soil water repellency, a method of soil moisture sequestration in pinyon-juniper woodland. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, n. 2, p. 624-634. 2010.
- RODRÍGUEZ-ALLERES, M.; BENITO, I.; BLAS, E. de. Extent and persistence of water repellency in north-western Spanish soils. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 21, n. 17, p. 2291-2299, 2007.
- ROPER, M. M. The isolation and characterization of bacteria with the potential to degrade waxes that cause water repellency in sandy soils. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 42, n. 4, p. 427-434. 2004.
- SCHAUMANN, G. E. et al. Influence of biofilms on the water repellency of urban soil samples. **Hydrological Processes**, Bristol, v. 21, n. 17, p. 2276-2284, 2007.
- SCOTT, D. F. Soil wettability in forested catchments in South Africa: as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 231, n. 1, p. 87-104, 2000.
- SHAKESBY, R. A.; DOERR, S. H.; WALSH, R. P. D. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 231, n. 1, p. 178-191. 2000.
- THWAITES, L. A. et al. Near-surface distributions of soil water and water repellency under three effluent irrigation schemes in a blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 86, n. 1-2, p. 212-219, 2006.
- VOGELMANN, E. S. et al. Water repellency in soils of humid subtropical climate of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 126-133, 2010.
- VOGELMANN, E. S. et al. Threshold water content beyond which hydrophobic soils become hydrophilic: The role of soil texture and organic matter content. **Geoderma**, Amsterdam, v. 209-210, p. 177-187. 2013a.
- VOGELMANN, E. S. et al. Hydro-physical processes and soil properties correlated with origin of soil hydrophobicity. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n.1, p. 1582-1589, 2013b.
- VOGELMANN, E. S. et al. Soil hydro-physical changes in natural grassland of southern Brazil subjected to burning management. **Soil Research**, Collingwood, v. 50, n. 6, p. 465-472, 2012.
- WAHL N. A. Variability of water repellency in sandy forest soils under broadleaves and conifers in north-western Jutland/Denmark. **Soil and Water Research**. Slezská, v. 3, n. 1, p. S155-S164. 2008.
- WANG, Z. et al. Unstable flow during redistribution: Controlling factors and practical implications. **Vadose Zone Journal**. Madison, v. 3, n. 2, p. 549-559. 2004.
- WOCHE, S. K. et al. Contact angle of soils as affected by depth texture and land management. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 56, n. 3, p. 239-251, 2005.