



IMPACTO DA CARGA COMBUSTÍVEL NAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE UM SOLO PÓS-INCÊNDIO
EM CONDIÇÕES LABORATORIAIS*

213

IMPACT OF FUEL LOAD ON POST-FIRE HYDROLOGICAL SOIL PROPERTIES UNDER LABORATORY CONDITIONS

Soraia Almeida

Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Algarve
soraibeatrizalmeida@gmail.com

Helena Fernandez

CIEO, ISE, Universidade do Algarve
hfernand@ualg.pt

Fernando Martins

CIEO, ISE, Universidade do Algarve
fmmartin@ualg.pt

Celestina Pedras

LEAF/ISA, FCT, Universidade do Algarve
cpedras@ualg.pt

Rui Lança

ISE, Universidade do Algarve
rlanca@ualg.pt

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar o impacto da carga de combustível nas propriedades hidrológicas de um solo franco arenoso, queimado em condições de laboratório. Para tal, foram recolhidas e transportadas para laboratório, amostras de solo não perturbado, onde foram queimadas depois de aplicar diferentes cargas de material combustível (agulhas de pinheiro). A taxa de infiltração e a sorvidade do solo diminuem fortemente com o aumento da carga de combustível.

Palavras-chave: Incêndio, taxa de infiltração, condutividade hidráulica, sorvidade, potencial matricial.

ABSTRACT

The aim of this work was to study the impact of fuel load on hydrological properties of a sandy loam soil burnt under laboratory conditions. To do this, undisturbed soil samples were collected and transported to the laboratory where they were burnt after applying different fuel loads (pine needles). The infiltration rate and soil sorptivity sharply reduced when fuel load increased.

Keywords: Fire, infiltration rate, hydraulic conductivity, sorptivity, water potential.

RESUMEN

Impacto de una carga de combustible en las características hidráulicas de un suelo post-incendio en un entorno laboratorial - El objetivo de este trabajo fue el estudio del impacto de la carga de combustible sobre las propiedades hidrológicas de un suelo franco arenoso quemado bajo condiciones de laboratorio. Para ello, se recogieron muestras de suelo no perturbadas y se transportaron al laboratorio, donde se quemaron después de aplicar diferentes cargas de combustible (hojas de pino). La tasa de infiltración y la sortividad del suelo se redujeron fuertemente al aumentar la carga de combustible.

Palabras clave: Incendio, tasa de infiltración, conductividad hidráulica, sortividad, potencial matricial.

RESUMÉ

Impacte de la charge combustible sur les propriétés hydrologiques d'un sol après incendie en conditions de laboratoire - L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact de la charge de combustible sur les propriétés hydrologiques d'un sol argileux sablonneux brûlé dans des conditions de laboratoire. Pour ce faire, des échantillons de sol non perturbés ont été recueillis et transportés au laboratoire où ils ont été brûlés après avoir appliqué différentes charges de combustible (aiguilles de pin). Le taux d'infiltration et la sorptivité du sol ont fortement diminué lorsque la charge de combustible a augmenté.

Mots-clé: Incendie, taux d'infiltration, conductivité hydraulique, sorptivité, potentiel matriciel.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentada no I Seminário da Rede Incêndios-Solo e I Simpósio Ibero-Afro-Americano de Riscos, tendo sido submetido em 24-11-2015, sujeito a revisão por pares a 09-01-2016 e aceite para publicação em 28-10-2016.

Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 24, 2017, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

Os incêndios florestais são parte integrante dos ecossistemas, no entanto, nas últimas décadas tem-se observado um aumento na frequência e severidade na região Mediterrânea (Shakesby, 2011). Portugal, Espanha, Itália, França e Grécia, são os países da União Europeia com maior índice de risco de deflagração e onde ocorrem as maiores perdas humanas, ambientais e económicas devido aos incêndios florestais (Laranjeira e Leitão, 2008). Segundo Lourenço (2007), nos últimos anos tem-se vindo a registar em Portugal um aumento do número de incêndios florestais e da área ardida, sendo que na maioria dos casos deve-se a causas antrópicas, especialmente à agricultura (Rodrigues *et al.*, 2016).

Dependendo da temperatura atingida e do tempo de duração dos picos térmicos, um incêndio florestal poderá causar impactos de menor ou maior severidade sobre a cobertura vegetal (Adámek *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2010; Francos *et al.*, 2016), a modificação das propriedades físicas e hidrológicas do solo (Gordillo-Rivero *et al.*, 2014; Mataix-Solera *et al.*, 2011) e, consequentemente, sobre o aumento do risco de inundação na bacia hidrográfica a jusante (Kean *et al.*, 2016; Pierce *et al.*, 2004). Dada a importância dos incêndios na floresta Mediterrânea regista-se também a necessidade de estudar o seu efeito nas propriedades hidráulicas de um solo nesta região. Moody *et al.* (2016) demonstrou que a condutividade hidráulica e a sorvidade diminuem com o aumento da severidade do incêndio numa floresta de *Pinus pinea*, em solo areia-franca, no Colorado, EUA. Em áreas mediterrâneas, diversos autores verificaram que a temperatura do fogo e a sua duração, assim como outras variáveis podem afetar as taxas de infiltração da água no solo devido a alterações na sua hidrofobicidade (Jordán *et al.*, 2013; Zavala *et al.*, 2010) ou a alteração do sistema de poros como resultado da presença de cinzas (Pereira *et al.*, 2015) e a destruição de agregados (Francos *et al.*, 2015; Jordán *et al.*, 2014; Mataix-Solera *et al.*, 2011).

Este estudo teve como objetivo principal conhecer o impacto da carga de combustível e o tempo de aquecimento sobre as propriedades hidrológicas de um solo queimado em condições de laboratório, com vista a desenvolver um método de previsão da infiltração em cenário pós-incêndio. Para tal foram recolhidas amostras não perturbadas de solo franco arenoso do Ludo (Algarve, sul de Portugal) às quais se adicionaram quantidades crescentes de material combustível constituído por agulhas de pinheiro (entre 0 e 16 kg m⁻²). Em laboratório as amostras foram queimadas (com duração entre 5 e 25 min) e determinou-se a condutividade hidráulica (k_s), a sorvidade (S) e o potencial matricial do solo (ψ).

Material e métodos

Num solo franco arenoso localizado no Ludo (37° 2.4' N, 7° 58.7' W) foram recolhidas quatro amostras, de forma aleatória com afastamento entre si inferior a 2 m, numa zona plana, coberta com vegetação de *Pinus pinea*, (fig. 1). Este local insere-se na única área florestal existente no concelho de Faro e tem sido sujeita a diversos incêndios nas últimas décadas. O solo existente é litólico não-húmico de arenitos grosseiros (Kopp *et al.*, 1989), desenvolvido sobre formação litológica de areias e cascalheiras de Faro-Quarteira, segundo mapa geológico à escala de 1:50000 (DGM, 1984). Cada amostra, com dimensão 50 cm × 50 cm × 25 cm, foi cortada lateralmente e confinada, de modo a não ser perturbada (fig. 2a). A base da amostra foi separada do substrato através da cravação horizontal de estacas de madeira (fig. 2b). A base da caixa, construída em chapa metálica perfurada, foi colocada entre as estacas de madeira e a amostra, de modo a permitir o seu transporte para o laboratório (fig. 2c).

Em laboratório foi determinada a granulometria das amostras do solo, através da análise granulométrica (areia, 0.05 – 2 mm; limo, 0.002 – 0.05 mm; argila, <0,002 mm) por peneiração e sedimentação de acordo com a especificação LNEC E-196 (1966). A porosidade foi determinada de acordo com a expressão, $\theta = V_v/V$, onde V_v é o volume de vazios e V é o volume total da amostra. Os valores médios do teor em água e de matéria orgânica foram obtidos a partir de quatro porções de solo retiradas de cada uma das amostras e determinados segundo a norma NP84 (1965) e o método *Loss-on-Ignition* (Schulte e Hopkins, 1996), respetivamente.

Em laboratório foram realizados incêndios sobre as amostras de solo, utilizando diferentes valores de carga combustível: 4 kg m⁻² (amostra B), 8 kg m⁻² (amostra C) e 16 kg m⁻² (amostra D). O máximo 16 kg m⁻² foi considerado representativo das condições do local (Almeida *et al.*, 2016). À amostra de controlo não foi adicionada carga combustível (amostra A). A carga combustível



Fig. 1 - Local de amostragem, Ludo (Algarve, sul de Portugal).

Fig. 1 - Sampling location, Ludo (Algarve, south of Portugal).

foi recolhida do local de amostragem e era constituída principalmente por agulhas de pinheiro. Este material foi deixado a secar em laboratório e cortado de forma a poder ser confinado na superfície da amostra. Durante os ensaios, a monitorização da temperatura fez-se para as modalidades extremas de carga combustível (amostras B e D), usando três sensores termopares que foram inseridos a 1.5 cm, 3.0 cm e 4.5 cm de profundidade. Os dados foram registados a cada 60 s e independentemente da duração da combustão, a monitorização da temperatura ocorreu até ser restabelecida a temperatura inicial no solo.

Para determinar a condutividade hidráulica (k_s), a sorvidade (S) e o potencial matricial do solo (ψ) nas diferentes amostras foram efetuados ensaios de infiltração com infiltrómetro de duplo anel, com diâmetro interior e exterior de 20 e 30 cm, respetivamente. Estes foram cravados na amostra até à profundidade de 5 cm. Durante a realização do ensaio foi mantida uma carga hidráulica constante de 3 cm sobre a superfície do solo, com recurso a duas válvulas de nível, uma no anel interior e outra entre os dois anéis (fig. 3 e 4).

Foram efetuadas medições do volume de água no reservatório que alimentava o anel interior (fig. 4), a cada minuto, durante um primeiro período de 20 minutos; a cada 2 minutos durante um segundo período de 14 minutos; a cada 5 minutos durante um terceiro período de 25 minutos; e a cada 10 minutos durante o resto do ensaio. Os ensaios tiveram durações aproximadas de três horas, sendo que no final a taxa infiltração permanecia aproximadamente constante.

Os valores de k_s e S foram obtidos através do modelo de Philips (Eq. 1) ajustado por regressão polinomial, de termo independente nulo, à série de dados observados $I = f(t)$, sendo I - infiltração (mm) e t - tempo (s).

$$I = k_s \times t + S \times t^{0.5} \quad (1)$$

O valor do ψ do solo foi calculado a partir do ajuste do modelo de *Green-Ampt* (Eq. 2) às curvas de infiltração observadas, sendo que $\Delta\theta = \theta - \theta_i$, com $\theta_i = Vw_i/V$, onde Vw_i é o volume de água inicial.

$$I = k_s t + \psi \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{I}{\psi \Delta\theta} \right) \quad (2)$$

Os fatores de correção da condutividade hidráulica (Kk_s) e da sorvidade (KS), para a condição pós-incêndio com diferentes quantidades de carga combustível ardida, são obtidos das seguintes equações:

$$Kk_s = \frac{k_{s\text{pós-incêndio}}}{k_{s\text{pré-incêndio}}} \quad (3)$$

$$KS = \frac{S_{\text{pós-incêndio}}}{S_{\text{pré-incêndio}}} \quad (4)$$

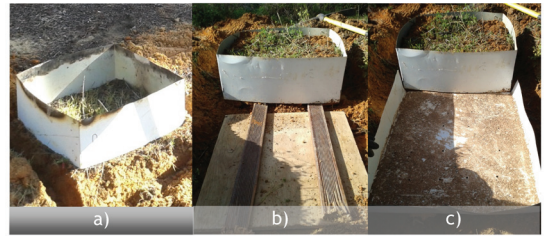


Fig. 2 - Recolha das amostras (dimensão 50 cm × 50 cm × 25 cm): a) corte e confinamento, b) cravação horizontal das estacas, c) colocação da base da caixa.

Fig. 2 - Field sampling (dimension 50 cm × 50 cm × 25 cm): cutting and boxing, b) insertion of horizontal wood stakes, c) insertion of the box floor.



Fig. 3 - Ensaio com infiltrómetro de duplo anel: a) amostra A; b) amostra D.

Fig. 3 - Experiment with double ring infiltrometer: a) sample A; b) sample D.

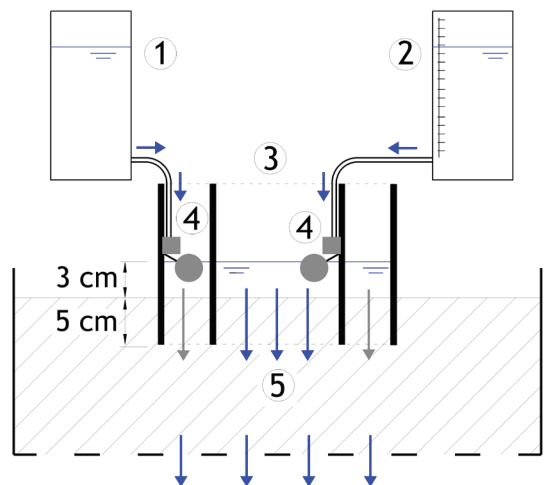


Fig. 4 - Esquema dos ensaios realizados com recurso a infiltrómetro de duplo anel. (1) reservatório ligado ao anel exterior do infiltrómetro, (2) reservatório ligado ao anel interior do infiltrómetro, (3) infiltrómetro de duplo anel, (4) válvula de nível, (5) amostra de solo não perturbada.

Fig. 4 - Design of double-ring infiltrometer experiments. (1) Water reservoir for external ring, (2) water reservoir for internal ring, (3) double ring infiltrometer, (4) level valve, (5) undisturbed soil sample.

O fator de correção do potencial matricial ($K\psi$) é dado por :

$$K\psi = \frac{\psi_{\text{pós-incêndio}}}{\psi_{\text{pré-incêndio}}} \quad (5)$$

216 Resultados

O solo apresentou valores de porosidade de aproximadamente 40%, sendo constituído por 88% de areia, 2% de limo e 10% de argila, pelo que foi classificado como franco arenoso segundo Kopp *et al.* (1989). A percentagem de matéria orgânica média era de cerca de $16.42 \pm 1.63 \text{ g kg}^{-1}$. Para um aumento da carga combustível de 4 kg m^{-2} para 16 kg m^{-2} observou-se um incremento na temperatura máxima de $54.0 \text{ }^\circ\text{C}$ (TABELA I).

O teor em água das amostras de solo pré-incêndio variou entre $0.87 \pm 0.06 \%$ (amostra A) e $0.93 \pm 0.04 \%$ (amostra C). No entanto, na situação pós-incêndio verificaram-se perdas médias de água em todas as amostras: 46.6% (amostra B), 30.1% (amostra C) e 63.8% (amostra D), TABELA I.

A temperatura máxima atingida no solo em cada ensaio aumentou com a carga combustível (fig. 5). Na amostra B (4 kg m^{-2} de carga de combustível), 20 minutos após o início da combustão, a temperatura ultrapassou ligeiramente os $250 \text{ }^\circ\text{C}$ a 1.5 cm da superfície. No caso

da amostra D (16 kg m^{-2}), 60 minutos após o início da combustão, verificou-se que a temperatura ultrapassou ligeiramente os $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a 1.5 cm da superfície. Na amostra D os picos térmicos foram mais elevados do que na amostra B e o tempo que levaram a atingir incrementou com a profundidade.

Os dados observados mostraram que a infiltração está inversamente relacionada com a carga combustível (fig.6), sendo maior na amostra A e menor na D.

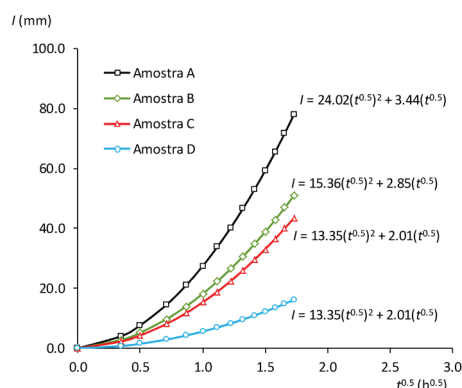


Fig. 6 - Infiltração acumulada, I , em função do tempo, t , para as diferentes amostras do solo (A, B, C e D).

Fig. 6 - Cumulative infiltration, I , in function of time, t , for different soil samples (A, B, C e D).

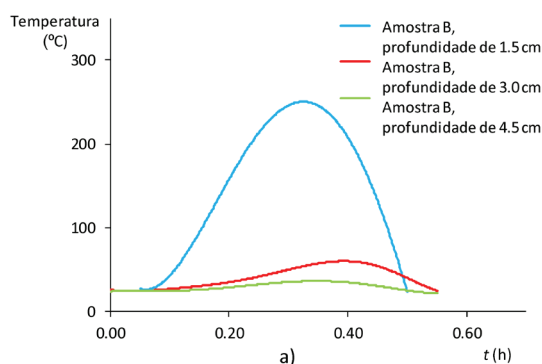


Fig. 5 - Registo das temperaturas durante a simulação do incêndio em laboratório: a) amostra B (carga combustível ardida 4 kg m^{-2}), b) amostra D (carga combustível ardida 16 kg m^{-2}).

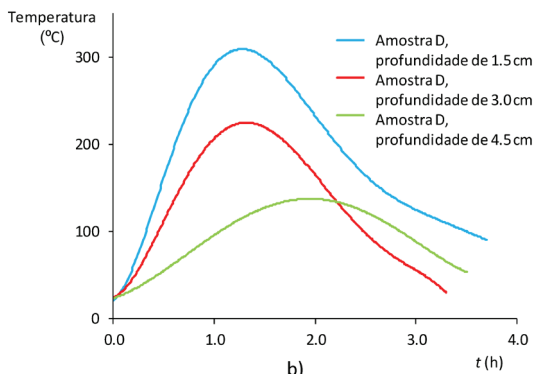


Fig. 5 - Temperature record during fire simulation at the laboratory: a) sample B (fuel load 4 kg m^{-2}), b) sample D (fuel load 16 kg m^{-2}).

TABELA I - Características dos ensaios de simulação de incêndio.

TABLE I - Characteristic of the fire simulation tests.

Amostra	A	B	C	D
Carga combustível total, $m \text{ (kg m}^{-2}\text{)}$	0	4	8	16
Duração da combustão (min)	--	5	20	25
Temperatura máxima durante a combustão ($^\circ\text{C}$)	--	254.5	--	308.5
Teor em água médio no solo, pré-combustão ^(a) (%)	0.87 ± 0.06	1.03 ± 0.13	0.93 ± 0.04	1.05 ± 0.14
Teor em água médio no solo, pós-combustão ^(a) (%)	--	0.55 ± 0.10	0.65 ± 0.08	0.38 ± 0.10

(a) O teor em água corresponde à média de 4 amostras.

O valor de k_s diminuiu de 15.36 mm h⁻¹ (amostra B) até 5.11 mm h⁻¹ (amostra D) com o incremento da carga combustível, para uma amostra de controlo (A) com 24.02 mm h⁻¹ (Tabela II). Tanto a sorvidade do solo como o potencial matricial comportam-se da mesma forma, atingindo valores de 0.5 mm h^{-0.5} e 0.28 mm, respetivamente, para a máxima carga de combustível (amostra D) (Tabela II). Os fatores de correção mostram uma relação linearmente inversa com a quantidade de carga combustível ($Kk_s = -0.0524 m + 1$, $r^2 = 0.92$; $KS = -0.0526 m + 1$, $r^2 = 0.99$; $K\psi = -0.0596 m + 1$, $r^2 = 0.92$), correspondendo a uma redução da infiltração de água no solo após saturação traduzida pelo fator Kk_s e uma menor capacidade de absorção da água por efeito de capilaridade traduzida por KS ou $K\psi$.

Em geral, a infiltração calculada pelo modelo de Green-Ampt (com parâmetros k_s e ψ pré-incêndio, corrigidos pelos respetivos fatores de correção) mostrou um bom ajuste com a infiltração experimental para cada caso (fig. 7). O erro relativo face aos valores observados foi inferior a 25% em todos os ensaios, o que provou a aplicabilidade do modelo de *Green-Ampt* a condições pós-incêndio.

Sempre que os resultados permitam quantificar a variação das propriedades hidráulicas em solos ardidos, é possível ajustar os modelos hidrológicos a bacias hidrográficas em cenário pós-incêndio. No entanto, mais estudos deverão ser levados a cabo por forma a alargar a aplicabilidade a outros solos e outros cobertos vegetais.

Discussão

Os picos da temperatura atingidos durante os ensaios correspondem a incêndios de baixa severidade ou queimadas controladas (Cawson *et al.*, 2012). A

TABELA II - Parâmetros hidrológicos (condutividade hidráulica, k_s ; sorvidade, S ; potencial matricial, ψ) e fatores de correção (condutividade hidráulica, Kk_s ; sorvidade, KS e potencial matricial, $K\psi$) para as amostras com diferentes quantidades de carga combustível ardida (A, 0 kg m⁻²; B, 4 kg m⁻²; C, 8 kg m⁻²; D, 16 kg m⁻²).

TABLE II - Hydrological parameters (infiltration rate, k_s ; soil sorptivity, S ; water potential, ψ) and correction factors (infiltration rate, Kk_s ; soil sorptivity, KS ; water potential, $K\psi$) for different soil samples burnt under different fuel loads (A, 0 kg m⁻²; B, 4 kg m⁻²; C, 8 kg m⁻²; D, 16 kg m⁻²).

Amostra	Parâmetros			Fatores		
	k_s (mm h ⁻¹)	S (mm h ^{-0.5})	ψ (mm)	Kk_s	KS	$K\psi$
A	24.02	3.44	3.43	1.00	1.00	1.00
B	15.36	2.85	3.17	0.64	0.83	1.05
C	13.35	2.01	1.28	0.56	0.59	0.43
D	5.11	0.50	0.28	0.21	0.15	0.09

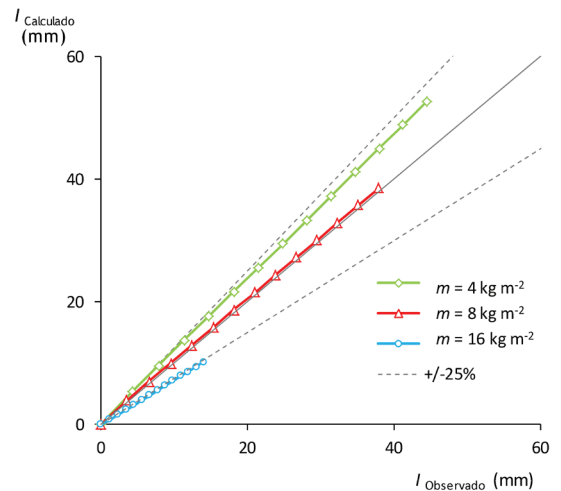


Fig. 7 - Relação entre infiltração observada vs calculada.

Fig. 7 - Relationship between the observed and calculated infiltration.

carga combustível influenciou a duração do fogo e a temperatura atingida, o que teve efeitos importantes sobre a taxa de infiltração e a sorvidade do solo. No intervalo de temperatura estudado, quer a taxa de infiltração, quer a sorvidade e o potencial matricial diminuíram acentuadamente de forma inversa com a carga combustível. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por outros autores (Granged *et al.*, 2011; Shalkeby e Doerr, 2006; Zavala *et al.*, 2010). Segundo Mataix-Solera *et al.* (2011), em solos onde a matéria orgânica é responsável pela agregação, a combustão contribui para a perda de estabilidade dos agregados e à libertação de partículas finas provenientes quer dos agregados quer das cinzas (Zavala *et al.*, 2009). Este efeito causa a colmatação dos poros, principalmente na superfície do solo, o que contribui para a diminuição da capacidade de infiltração da água (Holden *et al.*, 2014).

Outra possibilidade, não tida em conta neste estudo, é o aparecimento da hidrofobicidade do solo. Tem sido provado que, a hidrofobicidade do solo associada ao fogo ocorre por volta dos 250 °C e destrói-se a partir dos 450 °C, quando a combustão está completa (apesar de depender do tempo de duração dos picos térmicos). Os dados obtidos mostraram que durante a queima experimental alcançaram-se picos entre 250 °C e 300 °C nos primeiros 15 mm de solo. Deste modo, é possível que a hidrofobicidade seja, em parte, responsável pela diminuição da infiltração. No entanto, o impacto térmico na sorvidade e no potencial matricial (que diminuíram com o aumento da carga combustível) mostrou que, ou se mantiveram as condições hidrofóbicas ou, a importância da hidrofobicidade foi muito limitada (Cawson *et al.*, 2016). À escala detalhada, existem outros fatores que podem afetar a capacidade de infiltração, tanto ou mais importantes do que a hidrofobicidade, nomeadamente, os macroporos, as fissuras ou a colmatação do solo (Larsen *et al.*, 2009; Nyman *et al.*, 2014).

Dada a diversidade dos graus de severidade que podem ocorrer num incêndio florestal, os resultados sugerem que os parâmetros associados à condutividade hidráulica têm um padrão heterogêneo no pós-incêndio, ou seja, existem distintos mosaicos de zonas de infiltração e de formação ou transmissão da escorrência (Cawson *et al.*, 2013; Keesstra *et al.*, 2014). Este facto é relevante na altura de projetar planos de atuação e recuperação de solos queimados (Williams *et al.*, 2015), onde um estudo detalhado poderá permitir a identificação de áreas de maior risco de erosão e a aplicação de medidas corretivas à microescala.

Conclusão

Este estudo realizado em laboratório visou avaliar o impacto da carga combustível ardida nas propriedades hidráulicas de um solo franco arenoso. Com este propósito, foram recolhidas amostras de solo não perturbado, sobre as quais foram queimadas quantidades crescentes de material combustível representativo do local.

Durante o incêndio, as amostras com maior carga combustível apresentaram maiores picos de temperatura no solo, de tempo de combustão e da quantidade de cinzas depositadas na superfície. Em resultado observou-se que nestas mesmas amostras ocorreu uma diminuição da condutividade hidráulica, sorvidade e do potencial matricial.

Os modelos de *Philips* e *Green-Ampt* podem ser aplicados a solos queimados, desde que a condutividade hidráulica, sorvidade ou potencial matricial sejam corrigidos em função da carga combustível ardida.

Conhecendo os fatores de correção das propriedades hidráulicas do solo em função da carga combustível, torna-se possível ajustar os modelos hidrológicos a bacias hidrográficas em cenário pós-incêndio. No entanto, mais estudos deverão ser levados a cabo por forma a alargar a aplicabilidade da metodologia a outros solos e outros cobertos vegetais.

Referências bibliográficas

Adámek, M., Hadincová, V., Wild, J. (2016) Long-term effect of wildfires on temperate *Pinus sylvestris* forests: Vegetation dynamics and ecosystem resilience. *Forest Ecology and Management*, 380, p. 285-295.

Almeida, S., Martins, F., Fernandez, H., Pedras, C., Silva, E., Costa, R., Lança, R. (2016). Efeito do incêndio de Catraia no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Séqua. *Territorium*, 23, p. 153 - 160.

Castro, A., Meixedo, J., Vivas, A. (2010). *Avaliação do impacto do fogo controlado na vulnerabilidade dos solos florestais - uma contribuição*. Indústria e Ambiente 62-Solos, Publúndustria, Porto, p. 26-28.

Cawson, J.G., Nyman, P., Smith, H.G., Lane, P.N.J., Sheridan, G.J. (2016). How soil temperatures during prescribed burning affect soil water repellency, infiltration and erosion. *Catena*, 278, p. 12-22.

Cawson, J.G., Sheridan, G.J., Smith, H.G., Lane, P.N.J. (2012). Surface runoff and erosion after prescribed burning and the effect of different fire regimes in forests and shrublands: a review. *International Journal of Wildland Fire*, 21, p. 857-872.

Cawson, J.G., Sheridan, G.J., Smith, H.G., Lane, P.N.J. (2013). Effects of fire severity and burn patchiness on hillslope-scale surface runoff, erosion and hydrologic connectivity in a prescribed burn. *Forest Ecology and Management*, 310, p. 219-233.

DGM. (1984). Carta Geológica à escala 1:50 000. Direção-Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa.

Franco, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Mataix-Solera, J., Úbeda, X. (2015) Document Impact of an intense rainfall event on soil properties following a wildfire in a Mediterranean environment (North-East Spain). *Science of the Total Environment*. In press DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.145.

Franco, M., Úbeda, X., Tort, J., Panareda, J.M., Cerdà, A. (2016). The role of forest fire severity on vegetation recovery after 18 years. Implications for forest management of *Quercus suber* L. in Iberian Peninsula. *Global and Planetary Change*, 145, p. 11-16.

Granged, A.J.P., Jordán, A., Zavala, L.M., Muñoz-Rojas, M., Mataix-Solera, J. (2011). Short-term effects of experimental fire for a soil under eucalyptus forest (SE Australia). *Geoderma*, 167-168, p. 125-134.

Gordillo-Rivero, A.J., García-Moreno, J., Jordán, A., Zavala, L.M., Granja-Martins, F.M. (2014). Fire severity and surface rock fragments cause patchy distribution of soil water repellency and infiltration rates after burning. *Hydrological Processes*, 28, p. 5832-5843.

Holden, J., Wearing, C., Palmer, S., Jackson, B., Johnston, K. and Brown, L. E. (2014). Fire decreases near-surface hydraulic conductivity and macropore flow in blanket peat. *Hydrological Processes*, 28, p. 2868-2876.

Jordán, A., Gordillo-Rivero, A., García-Moreno, J., Zavala, L.M., Granged, A.J.P., Gil, J., Neto-Paixão, H.M. (2014). Post-fire evolution of water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils: a 6-year study. *Catena*, 118, p. 115-123.

Jordán, A., Zavala, L.M., Mataix-Solera, J., Doerr, S.H. (2013). Soil water repellency: origin, assessment and geomorphological consequences. *Catena*, 108, p. 1-8.

- Kean, J. W., McGuire, L.A., Rengers, F.K., Smith, J.B., Staley, D.M. (2016). Amplification of postwildfire peak flow by debris. *Geophysical Research Letters*, 43, p. 8545-8553.
- Keesstra, S.D., Maroulis, J., Argaman, E., Voogt, A., Wittenberg, L. (2014). Effects of controlled fire on hydrology and erosion under simulated rainfall. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40, p. 269-294.
- Kopp, E. S., Soares, M., Woerner, M. (1989). Os solos do Algarve e as suas características; vista geral (No. 631.409469 S689). Ministério da Agricultura, Pesca e Alimentação, Faro (Portugal). Direção Regional de Agricultura do Algarve Sociedade Alemanha de Cooperação Técnica, Eschborn (Alemanha), 179.
- Larsen, I.J., MacDonald, L.H., Brown, E., Rough, D., Welsh, M.J., Pietraszek, J.H., Libohova, Z., Benavides-Solorio, J., Schaffrath, K. (2009). Causes of post-fire runoff and erosion: water repellency, cover, or soil sealing? *Soil Science Society of America Journal*, 73, p. 1393-1407.
- Lourenço, Luciano (2007). Incêndios florestais de 2003 e 2005. Tão perto no tempo e já tão longe na memória. Riscos Ambientais e Formação de Professores (Actas das VI Jornadas Nacionais do Prosepe), *Colectâneas Cindinicas VII*, Núcleo de Investigação Científica de Incêndios Florestais, Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, p. 19-91.
- Laranjeira, I., Leitão, T. (2008). Avaliação do Impacto de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos. Análise do impacto dos fogos florestais na qualidade química das águas superficiais e subterrâneas das áreas de estudo da Região Centro. 3.º *Relatório de Progresso relativo ao ano de 2007*, LNEC, 88.
- LNEC E-196 (1966). Solos - Análise granulométrica. Especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 10.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. M. (2011). Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews*, 109, p. 44-60.
- Moody, J. A., Ebel, B. A., Nyman, P., Martin, D. A., Stoof, C., & McKinley, R. (2016). Relations between soil hydraulic properties and burn severity. *International Journal of Wildland Fire*, 25, p. 279-293.
- NP 84 (1965). Solos - Determinação do Teor em Água. Norma Portuguesa, Inspeção Geral dos Produtos Agrícolas e Industriais (IGPAL), Repartição de normalização, Lisboa, 2.
- Nyman, P., Sheridan, G.J., Smith, H.G., Lane, P.N.J. (2014). Modeling the effects of surface storage, macropore flow and water repellency on infiltration after wildfire. *Journal of Hydrology*, 513, p. 301-313.
- Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X, Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Zavala, L.M. (2015). Modelling the impacts of wildfire on ash thickness in a short-term period. *Land Degradation & Development*, 26, p. 180-192.
- Pierce, J.L., Meyer, G.A., Jull A.J.T. (2004). Fire-induced erosion and millennial-scale climate change in northern ponderosa pine forests, *Nature*, v. 432, p. 87-90.
- Rodrigues, M., Jiménez, A., de la Riva, J. (2016). Analysis of recent spatial-temporal evolution of human driving factors of wildfires in Spain. *Natural Hazards*, p. 1-22. *In press* DOI: 10.1007/s11069-016-2533-4.
- Schulte, E. E., Hopkins, B. G. 1996. Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition. In Magdoff, F. R. *et al.* (eds.) *Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation*. SSSA Spec. Pub. No. 46. SSSA, Madison, p. 21-31.
- Shakesby, R. A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105, p. 71-100.
- Williams, C.J., Pierson, F.B., Robichaud, P.R., Al-Hamdan, O.Z., Boll, J., Strand, E.K. (2015). Structural and functional connectivity as a driver of hillslope erosion following disturbance. *International Journal of Wildland Fire*, 25, p. 306-321.
- Zavala, L. M., Granged, A. J., Jordán, A., & Bárcenas-Moreno, G. (2010). Effect of burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions. *Geoderma*, 158, p. 366-374.
- Zavala, L.M., Jordán, A., Gil, J., Bellinfante, N., Pain, C. (2009). Intact ash and charred litter reduces susceptibility to rain splash erosion post-wildfire. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, p. 1522-1532.