

VI-250 - AVALIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DA SUPERFÍCIE DO SOLO USANDO TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHOS

João L. M. P. de Lima ⁽¹⁾

Doutor em Ciências Ambientais pela Universidade de Wageningen. Professor Catedrático na Universidade de Coimbra. Engenheiro Especialista em Hidráulica e Recursos Hídricos pela Ordem dos Engenheiros. Investigador do Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (MARE).

João R. C. B. Abrantes ⁽²⁾

Mestre em Engenharia do Ambiente e doutorando em Engenharia Civil, com Especialidade em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente na Universidade de Coimbra. Investigador do Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (MARE).

Jorge M. G. P. Isidoro ⁽³⁾

Doutor em Engenharia Civil, com Especialidade em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente pela Universidade de Coimbra. Professor Adjunto na Universidade do Algarve. Investigador do Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (MARE).

M. Isabel P. de Lima ⁽⁴⁾

Doutora em Ciências Ambientais pela Universidade de Wageningen. Professora Auxiliar com Agregação na Universidade de Coimbra. Investigadora do Centro de Ciências do Mar e do Ambiente (MARE).

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Pólo 2, Universidade de Coimbra: 3030-788 - Coimbra - Portugal - Tel: (+351) 239797183 - e-mail: plima@dec.uc.pt

Endereço⁽²⁾: Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Pólo 2, Universidade de Coimbra: 3030-788 - Coimbra - Portugal - Tel: (+351) 239797100 - e-mail: jrcbrito@msn.com

Endereço⁽³⁾: Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve: 8005-139 - Faro - Portugal - Tel: (+351) 289800100 - e-mail: jisidoro@ualg.pt

Endereço⁽⁴⁾: Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Pólo 2, Universidade de Coimbra: 3030-788 - Coimbra - Portugal - Tel: (+351) 239797119 - e-mail: iplima@uc.pt

RESUMO

A termografia de infravermelhos tem como base a deteção da radiação infravermelha emitida pelos corpos, convertendo-a posteriormente em imagens visíveis (termogramas). Estas imagens, que contêm informação sobre a temperatura da superfície dos corpos, são já utilizadas por exemplo na monitorização de processos industriais, construção civil, medicina, veterinária e agricultura. Recentemente, no Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (LHRHA) da Universidade de Coimbra (Portugal), a termografia por infravermelhos começou a ser aplicada na determinação da variabilidade espacial e temporal das características da superfície do solo. A técnica termográfica que tem sido desenvolvida tem como base a indução de diferenças térmicas na superfície do solo, *i.e.*, em vários dos seus elementos/constituintes. Esta técnica tem sido utilizada, com sucesso, para diferentes objetivos/aplicações, nomeadamente: a modelação do microrelevo da superfície do solo, a caracterização da permeabilidade e da macroporosidade da superfície do solo, e a identificação de áreas hidrofóbicas à superfície do solo. A técnica termográfica apresenta como principais vantagens a rapidez e facilidade de execução, bem como o baixo custo de aquisição, de operação do equipamento e de processamento de dados, quando comparada com outras técnicas.

Neste artigo são apresentados alguns exemplos de estudos desenvolvidos com o objetivo de modelar o microrelevo da superfície do solo, avaliar a macroporosidade e a permeabilidade do solo, identificar áreas hidrofóbicas na superfície do solo e estimar a velocidade de escoamento superficial. Atualmente, estão a ser conduzidos estudos para alargar o âmbito, a escala e as áreas de aplicação da técnica termográfica em estudos hidrológicos, transportando a experiência laboratorial para o campo. No Brasil, mais concretamente através de uma colaboração com a Universidade Federal Rural de Pernambuco, esta técnica está a ser utilizada experimentalmente no campo com o objetivo de avaliar a erosão hídrica do solo e, consequentemente, de implementar medidas de conservação do solo e da água no semiárido.

PALAVRAS-CHAVE: Termografia por infravermelhos, Superfície do solo, Hidrologia de superfície.

INTRODUÇÃO

A termografia por infravermelhos é uma tecnologia de base ótica, baseada em detetar a radiação infravermelha emitida pelos corpos, não visível pelo olho humano, convertendo-a em termogramas, isto é, imagens que representam a temperatura de superfície num dado domínio espacial. Na verdade, a termografia por infravermelhos tem sido utilizada desde há várias décadas, desde o lançamento dos primeiros satélites equipados com sensores de infravermelhos. O método baseia-se no facto de todos os corpos emitirem radiação infravermelha, sendo a intensidade da radiação emitida dependente da temperatura desse corpo e da sua capacidade de emitir radiação (*i.e.* da sua emissividade). Assim, a câmara termográfica transforma a radiação térmica emitida pelos corpos numa imagem visível (quanto mais quente está um corpo, maior a radiação emitida pelo mesmo). Esta imagem visível apresenta, normalmente, uma escala de cores em função da gama de temperaturas, o que permite identificar variações de temperatura na sua superfície. Ou seja, permite detetar heterogeneidades existentes em elementos presentes numa dada superfície, em função da distribuição de energia térmica emitida.

A termografia por infravermelhos é uma tecnologia já estabelecida em diversos campos da indústria, como sejam a aeronáutica, automóvel, saúde, agrícola, entre outras. Contudo, a termografia por infravermelhos tem potencial para ser aplicada noutras áreas, nomeadamente nas ciências ambientais e, mais especificamente, na hidrologia de superfície. Neste contexto, o desenvolvimento de câmaras termográficas portáteis tem facilitado a utilização desta tecnologia em trabalhos de investigação, em campo e laboratório, com principais vantagens associadas à redução de custos, fácil manuseamento e ajuste do campo de visão da câmara à área de estudo (*e.g.* PFISTER *et al.* 2010; SCHUETZ *et al.* 2012; DE LIMA *et al.* 2014a; DE LIMA *et al.* 2014b; DE LIMA *et al.* 2014c). Para além destas vantagens, a termografia por infravermelhos é uma técnica de medição sem contacto sendo, portanto, um ensaio não destrutivo e que não causa qualquer interferência com o objeto da medição.

Em anos recentes, tem vindo a ser realizado na Universidade de Coimbra (Portugal) trabalho experimental na área da hidrologia de superfície, destacando-se a aplicação que visa o estudo da variabilidade espacial e temporal de características da superfície do solo e do escoamento superficial. De uma forma simplificada, neste tipo de aplicações, a técnica usada baseia-se em induzir diferenças térmicas na superfície do solo, permitindo assim fazer-se a distinção entre áreas com diferentes temperaturas. Exemplos de alguns estudos são a modelação do microrelevo da superfície do solo (DE LIMA e ABRANTES 2014a), a avaliação da macroporosidade (DE LIMA *et al.* 2014b) e da permeabilidade (DE LIMA *et al.* 2014c) do solo, a identificação de áreas hidrofóbicas na superfície do solo (ABRANTES *et al.* 2016) e a estimativa da velocidade de escoamento superficial (DE LIMA *et al.* 2015). Presentemente, estão a ser conduzidos estudos para alargar o âmbito, a escala e as áreas de aplicação da termografia em estudos hidrológicos, transpondo-se o conhecimento obtido em condições laboratoriais para o campo. Neste trabalho, pretende revisitar-se as aplicações já exploradas e discutir-se as perspetivas de desenvolvimento relativamente a outras aplicações desta tecnologia, em linha com trabalhos em curso na Universidade de Coimbra, contando com a colaboração de outras instituições portuguesas (*e.g.* MARE, Universidade de Aveiro, CESAM, IMAR) e brasileiras (*e.g.* UFRPE).

METODOLOGIA UTILIZADA

Nas aplicações da técnica termográfica relatadas neste trabalho, o objeto de estudo foi o solo, em particular algumas das características físicas da sua superfície. As imagens termográficas foram obtidas com câmaras termográficas portáteis (manuais, montadas em estruturas ou transportadas em *drones*), posicionadas sobre a superfície do solo com a direção focal perpendicular à mesma. A resolução das câmaras, em combinação com a altura de operação acima da superfície a estudar, determina o tamanho dos píxeis, na captação da informação sobre a temperatura na superfície estudada. Os dados obtidos são processados de acordo com o objetivo do ensaio, que pode tipicamente incluir o mapeamento das variáveis a estudar (*e.g.* permeabilidade, hidrofobicidade).

Várias das aplicações da tecnologia termográfica ensaiadas em laboratório auxiliam-se de canais de terra. Os canais permitem simular diferentes geometrias, declives e materiais da superfície do solo, entre outras variáveis. A sua preparação segue procedimentos bem identificados, de forma a garantir a replicabilidade dos ensaios, e a

captar a informação pertinente a estudos específicos. Os ensaios, quando baseados na indução de um diferencial de temperatura na superfície do solo, usam a água como traçador térmico, que terá de ser aplicada a uma temperatura diferente da do meio em estudo; a opção pela utilização de água mais quente ou mais fria que o meio depende do estudo específico. Noutros casos, as condições (naturais, heterogêneas) da superfície determinam, por si só, a variação de sinal térmico observado.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA

A título de exemplo das aplicações a revisitar neste trabalho, apresentamos alguns resultados do estudo da macroporosidade do solo, efetuado em laboratório, recorrendo a um canal de terra, como esquematizado na Fig. 1. O canal, metálico, retangular com 3.00 m × 0.30 m, foi operado com o declive de 10%. O canal foi preenchido com 0.12 m de solo franco-arenoso, com condutividade hidráulica saturada de 4.33×10^{-6} m/s. O solo foi espalhado de modo uniforme no canal e compactado até se conseguir uma superfície lisa e sem rugosidades, atingindo uma densidade de ≈ 1400 kg/m³, sendo posteriormente humedecido e deixado secar. Foram criados macroporos na superfície do solo, com 16 mm × 16 mm, com 12 mm × 10 mm e com 6 mm × 6 mm, através da perfuração do solo com perfis metálicos, criando padrões regulares, como sejam os visíveis na Fig. 2 (superior).

Os registos térmicos da superfície do solo foram realizados com uma câmara de infravermelhos portátil Optris PI-160 (Optris GmbH) com uma resolução ótica de 160 × 120 pixéis, uma resolução térmica de 0.1°C e uma frequência de captação de imagens de 60 Hz.

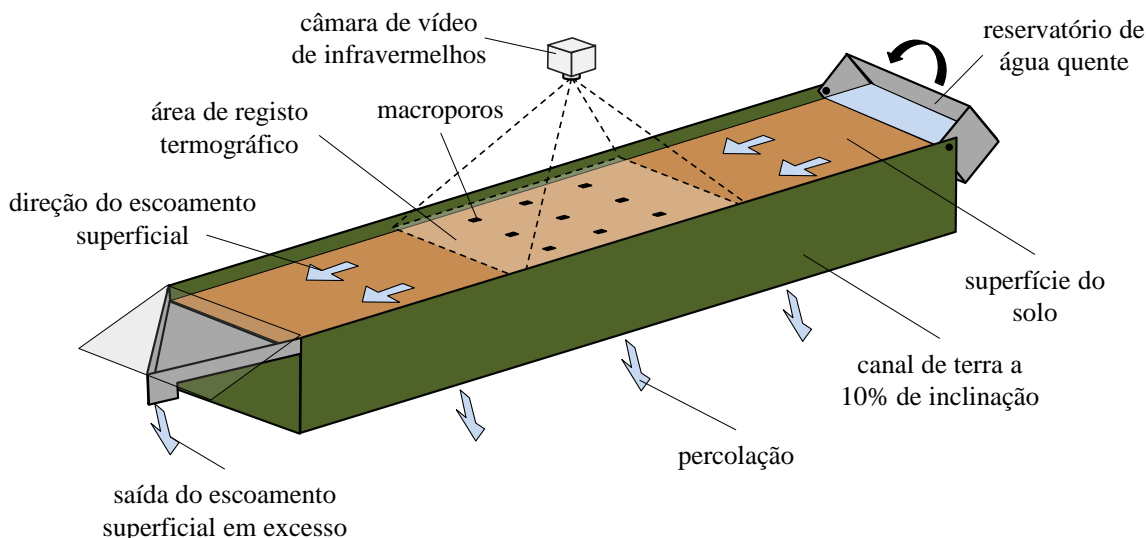


Figura 1: Esquema da instalação utilizada nos ensaios laboratoriais [adaptado de DE LIMA *et al.* 2014b].

Um reservatório de água instalado a montante do canal (Fig. 1) permitia a aplicação de um volume de 1.5 L de água quente (a uma temperatura entre 80°C e 85°C) sobre a superfície do solo como escoamento superficial. A aplicação dessa água realizou-se num movimento suficientemente rápido que permitisse criar a passagem de uma onda de água de altura quase uniforme sobre o solo, mas que, ao mesmo tempo, não provocasse alteração da configuração da superfície do solo. A água quente, ao escoar quase uniformemente sobre o solo, o que é acompanhado de infiltração, concentra-se mais facilmente nos macroporos. Assim, nas imagens termográficas recolhidas durante o ensaio, os macroporos apresentam temperaturas mais elevadas devido à acumulação da água quente, permitindo a localização e caracterização geométrica do conjunto de macroporos criados na superfície do solo. Este facto pode ser observado a partir dos termogramas obtidos através da câmara termográfica apresentados na Fig. 2 (inferior). As cores mais “quentes”, correspondentes às temperaturas mais elevadas, indicam a localização dos macroporos, sendo que a dimensão dos mesmos é passível de ser estimada pela dimensão da área de maior temperatura e diferente coloração, bem como pela temperatura dessas áreas. Aos macroporos com secções de menor área correspondem temperaturas mais baixas, devido à menor

quantidade de água quente concentrada nesses macroporos. Por esta razão, macroporos de maior dimensão apresentam geometrias melhor definidas. A geometria retangular destes macroporos criados artificialmente na superfície do solo, não foi bem caracterizada pois os ângulos retos das secções foram suavizados devido a processos de difusão térmica.

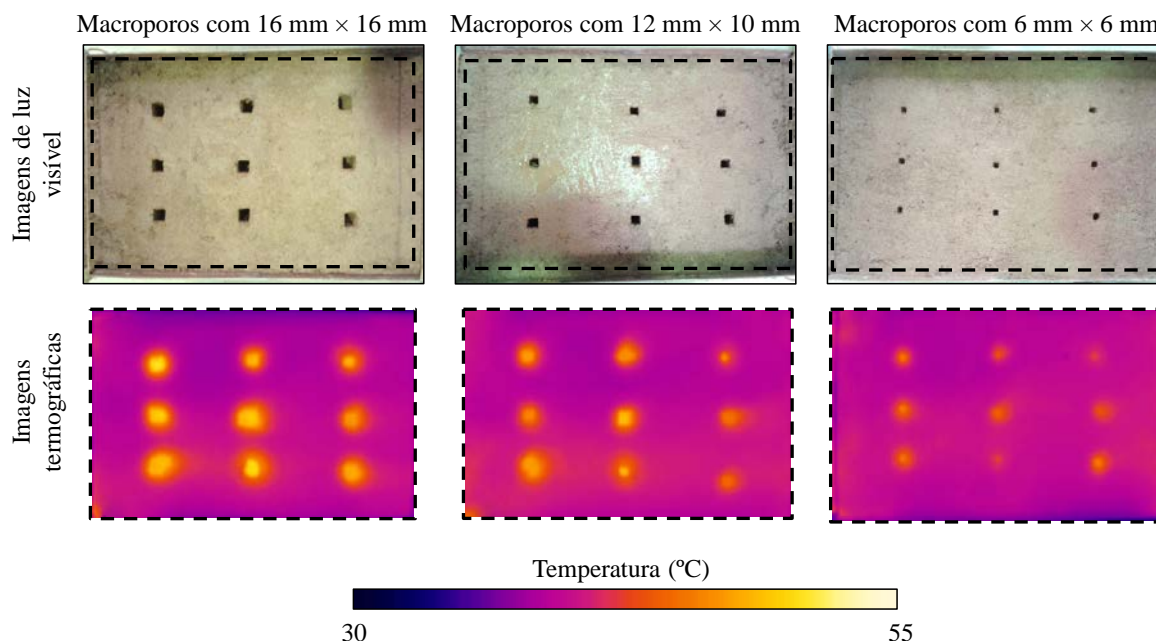


Figura 2: Caracterização da macroporosidade. Imagens de luz visível (painéis superiores) e imagens termográficas (painéis inferiores) da superfície do solo [adaptado de DE LIMA *et al.* 2014b].

CONCLUSÕES

Neste trabalho são referidas várias aplicações de termografia por infravermelhos à hidrologia de superfície que têm sido desenvolvidas durante os últimos anos na Universidade de Coimbra (Portugal). Da experiência adquirida no uso desta tecnologia e das conclusões dos trabalhos experimentais desenvolvidos, destaca-se:

- i) Quando aplicada a estudos hidrológicos, em particular no estudo de algumas características físicas da superfície do solo, a termografia por infravermelhos, enquanto método não invasivo/destrutivo, apresenta-se como um método eficaz, económico, versátil e preciso, devendo ser visto como um método com interesse potencial;
- ii) A termografia por infravermelhos é uma tecnologia ambientalmente limpa, possibilitando o uso de água ou gelo como traçador (térmico), ao contrário de outras técnicas (*e.g.* que fazem uso de traçadores radioativos ou coloridos);
- iii) A captação, pelas câmaras termográficas, do diferencial térmico estabelecido entre os elementos em análise depende da resolução das câmaras termográficas utilizadas, por sua vez condicionante do detalhe obtido na informação recolhida, com impacto importante no processo de interpretação dos dados quando se utilizam *drones* a alturas elevadas;
- iv) O sucesso nas aplicações da termografia por infravermelhos, nomeadamente em campo, assenta na interpretação do sinal registado nas observações, para o que é necessário estabelecer protocolos de aquisição e análise de dados.

AGRADECIMENTOS

Projeto HIRT - “Modelling surface hydrologic processes based on infrared thermography at local and field scales” (PTDC/ECM-HID/4259/2014 - POCI-01-0145-FEDER-016668), e projeto estratégico UID/MAR/04292/2019 concedido ao MARE. financiados pela FCT, Portugal, e pelo FEDER.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRANTES, J.R.C.B., DE LIMA, J.L.M.P., PRATS, S. KEIZER, J.J. Field Assessment of Soil Water Repellency Using Infrared Thermography. *Forum Geografic*, v.XV(Suppl.2), p.12-18.
2. DE LIMA, J.L.M.P., ABRANTES, J.R.C.B. Can infrared thermography be used to estimate soil surface microrelief and rill morphology? *CATENA*, v.113, p.314-322, 2014a.
3. DE LIMA, J.L.M.P., ABRANTES, J.R.C.B., SILVA JR, V.P., DE LIMA, M.I.P.; MONTENEGRO, A.A.A. Mapping soil surface macropores using infrared thermography: Exploratory laboratory study. *Scientific World Journal*, v.2014, ID 845460, 2014b.
4. DE LIMA, J.L.M.P., ABRANTES, J.R.C.B., SILVA JR., V.P., MONTENEGRO, A.A.A. Prediction of skin surface soil permeability by infrared thermography: a soil flume experiment. *Quantitative InfraRed Thermography*, v.11, n.2, p.161-169, 2014c.
5. DE LIMA, R.L.P., ABRANTES, J.R.C.B., DE LIMA, J.L.M.P., DE LIMA, M.I.P. Using thermal tracers to estimate flow velocities of shallow flows: laboratory and field experiments. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, v.63, n.3, p.255–262, DOI: 10.1515/johh-2015-0028, 2015.
6. PFISTER, L., MCDONNELL, J.J., HISSLER, C., HOFFMAN, L. Ground-based thermal imagery as a simple, practical tool for mapping saturated area connectivity and dynamics. *Hydrological Processes*, v.24, n.21, p.3123-3132, 2010.
7. SCHUETZ, T., WEILER, M., LANGE, J., STOELZLE, M. Two-dimensional assessment of solute transport in shallow waters with thermal imaging and heated water. *Advances in Water Resources*, v.43, p.67-75, 2012.