

## Termografia para determinação da microtopografia da superfície do solo em diferentes condições de cobertura morta

João R. C. B. Abrantes<sup>1</sup>, João L. M. P. de Lima<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto do Mar (IMAR/MARE), Universidade de Coimbra, Pólo 2, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, 3030-788, Coimbra, Portugal.  
E-mail: jrcbrito@msn.com; plima@dec.uc.pt

### RESUMO

Neste estudo se apresentou uma técnica de termografia por infravermelhos, passível de ser útil na deteção da microtopografia da superfície do solo na presença de cobertura morta. Ensaios laboratoriais foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho da técnica numa superfície com sulcos artificiais em uma superfície com microtopografia criada por erosão hídrica para diferentes condições de cobertura morta (solo nu, 2 e 4 t ha<sup>-1</sup>). A microtopografia foi detetada aplicando-se água quente sobre a superfície do solo e se registando a temperatura com uma câmara de vídeo de infravermelhos. A técnica permitiu obter modelos 3D da superfície do solo para o cenário com sulcos artificiais e para os cenários com microtopografia criada por erosão hídrica. A termografia permitiu identificar caminhos preferenciais de escoamento e os diferentes elementos da microtopografia, mesmo na presença de 2 t ha<sup>-1</sup> de cobertura morta, em superfície do solo. No cenário com densidade de cobertura de 4 t ha<sup>-1</sup>, a deteção da radiação térmica emitida pela superfície do solo foi bastante afetada originando diminuição da performance da técnica estudada.

**Palavras-chave:** deteção remota, erosão hídrica, microrrelevo

### *Thermography as a remote sensing tool of soil surface microtopography in the presence of mulch*

### ABSTRACT

In this study we present an infrared thermography technique that can be useful to detect soil surface microtopography in the presence of mulch. Laboratory test were carried out where the performance of the technique was evaluated in a surface with artificial rills and in a surface with microtopography created by water erosion, for different mulch cover conditions (bare soil, 2 and 4 t ha<sup>-1</sup>). Microtopography was detected applying heated water on the soil surface and recording the temperature with an infrared video camera. The technique allowed us to obtain 3D models of soil surface elevation both in the scenario with artificial rills and in the scenario with microtopography created by water erosion. With this technique it was possible to identify preferential flow paths and the different elements of microtopography, even in the presence of 2 t ha<sup>-1</sup> of mulch covering the soil surface. In the scenario with cover density of 4 t ha<sup>-1</sup>, the detection of the thermal radiation emitted by the soil surface was severely affected, resulting in a decrease of the performance of the technique.

**Key words:** remote sensing, water erosion, microrelief

## Introdução

O escoamento superficial e a erosão hídrica são os principais responsáveis pela degradação dos solos em áreas agrícolas contribuindo significativamente para a diminuição da produtividade das culturas e para o problema da qualidade da água em bacias hidrográficas (Santos et al., 2008; Santos & Montenegro, 2012). Este fenômeno é ainda mais relevante em áreas agrícolas de regiões semiáridas caracterizadas por possuírem solos com baixa capacidade de retenção de água e regimes pluviométricos irregulares, na distribuição temporal e espacial, com chuvas curtas e por vezes muito intensas, que ocorrem sobretudo no início da estação chuvosa (de Lima et al., 2013), pelo que é crucial a compreensão dos fenômenos e processos que condicionam o escoamento superficial e, em contrapartida, a erosão hídrica.

Um parâmetro muito significativo na modelagem dos processos de erosão hídrica e que não deve ser negligenciado, é a microtopografia da superfície do solo (Darboux & Huang, 2005). Esta representa as microvariações topográficas da superfície do solo (e.g. microdepressões, microelevações) sendo sua distribuição espacial (Allmaras et al., 1966) o resultado de diversos fatores que alteram a camada superficial do solo, como a erosão hídrica e as práticas agrícolas (Vidal Vázquez et al., 2005, 2010a; Castro et al., 2006; Paz-Ferreiro et al., 2008; Siqueira et al., 2012).

A microtopografia é responsável por afetar bastante diversos processos que ocorrem a nível da superfície do solo, como a retenção superficial (Vidal Vázquez et al., 2005, 2010b), a infiltração, o escoamento superficial, o transporte sólido (Darboux & Huang, 2005; Castro et al., 2006; Volk & Cogo, 2009), o encrostamento da superfície e as trocas de calor do solo com a atmosfera (Price et al., 1998).

Para uma modelagem precisa dos processos conducentes à erosão hídrica é necessária informação detalhada sobre a microtopografia da superfície do solo, com precisão e resolução elevada, em particular na modelagem dos processos relacionados com a erosão em sulcos, como a iniciação e o desenvolvimento da rede de sulcos (Favis-Mortlock et al., 2000; Hofer et al., 2012).

Apesar das várias técnicas e equipamentos existentes caracterizarem a superfície do solo com resolução adequada à modelagem desses processos, obter a microtopografia continua a ser uma tarefa árdua que, em geral, requer grande consumo de recursos e/ou tempo (Jester & Klik, 2005). Atualmente, sistemas a laser (Bertolani et al., 2000; Aguilar et al., 2009; Eitel et al., 2011) e fotográficos (Rieke-Zapp & Nearing, 2005; Aguilar et al., 2009; Garcia Moreno et al., 2010) permitem caracterizar rapidamente a microtopografia da superfície do solo e se obter modelos digitais da superfície do solo com elevada precisão e resolução. No entanto, esses sistemas apresentam custos elevados e sua aplicação em campo é limitada devido às condições climáticas (e.g. luz ambiente, poeiras) sendo que, na maioria dos casos, sua utilização se limita a estudos em laboratório.

Os perfilômetros continuam a ser os equipamentos mais utilizados para caracterizar a microtopografia da superfície do solo, em especial no campo (Bertolani et al., 2000; Castro

et al., 2006; Carvalho Filho et al., 2007; Panachuki et al., 2010) porém apresentam uma resolução baixa e sua utilização envolve um consumo de tempo pois, em geral, a obtenção dos dados é realizada ponto a ponto e de forma manual.

Um dos principais problemas associados à caracterização da microtopografia é a presença de vegetação ou cobertura morta na superfície do solo. Nessas condições, a aquisição de dados pelos sistemas a laser e os equipamentos fotográficos são bastante afetados, dado que, ao invés de caracterizar a microtopografia da superfície do solo esses sistemas registram as características da vegetação ou da cobertura morta por cima do solo. Este é um problema que ganha especial relevância quando se pretende estudar os processos de erosão hídrica em áreas agrícolas de regiões semiáridas e, onde também é comum a adoção de práticas de conservação da umidade do solo, como a aplicação de cobertura morta sobre o solo e a utilização de vegetação rasteira (Santos et al., 2008; Montenegro et al., 2013a, 2013b).

Neste estudo se apresenta uma técnica para detecção do microtopografia do solo utilizando-se termografia por infravermelhos. A termografia por infravermelhos tem sido aplicada como ferramenta de imagem de alta resolução em diferentes estudos hidrológicos (e.g. identificação de fontes pontuais de poluição, caracterização do movimento e dispersão de poluentes). Em particular, sistemas portáteis de termografia (e.g. câmeras de vídeo de infravermelhos) têm sido utilizados em virtude da facilidade de manipulação em estudos de campo (Pfister et al., 2010; Schuetz et al., 2012).

Este trabalho tem, como objetivo, avaliar a utilização da termografia na caracterização da microtopografia da superfície do solo na presença de cobertura morta.

## Material e Métodos

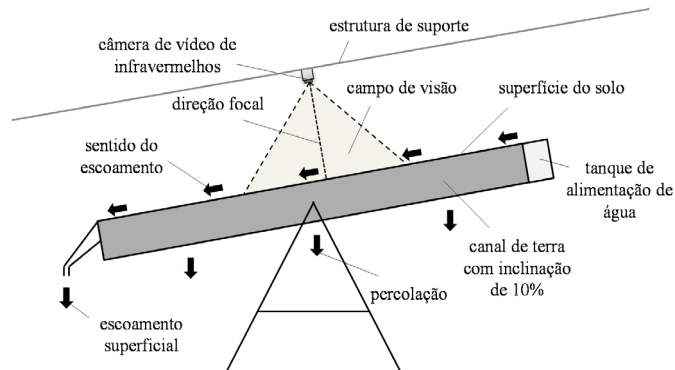
### Instalação experimental

O estudo apresentado foi conduzido em laboratório, conforme o esquema da Figura 1. Os experimentos foram constituídos por dois canais de terra, fixados a uma inclinação de 10%, um sistema da alimentação de água instalado a montante dos canais e um sistema termográfico de gravação de vídeo de infravermelhos.

Foram utilizados dois canais de terra retangulares de dimensões diferentes: i) um canal mais estreito, com 0,3 m de largura e ii) um canal mais largo, com 1,0 m de largura. Esses canais têm sido utilizados frequentemente para estudos de hidrologia de superfície (de Lima et al., 2003, 2008, 2009, 2011; Montenegro et al., 2013a, 2013b), nomeadamente sobre a aplicação de termografia para estudos de erosão hídrica e de caracterização do escoamento superficial (de Lima & Abrantes, 2014a, 2014b). Os canais de terra utilizados permitem a percolação livre da água por meio da camada de solo.

Os canais foram preenchidos com solo franco-arenoso constituído por 84% de areia, 9% de limo e 7% de argila, recolhido na margem esquerda do Rio Mondego, Coimbra, Portugal (de Lima et al., 2003). O solo foi uniformemente espalhado nos canais, nivelado e compactado de modo a se obter uma superfície do solo lisa e sem rugosidades, com uma camada de solo de 0,1 m de espessura, condições em que o solo apresentou densidade de 1700 kg m<sup>-3</sup>.

A utilização de dois canais de dimensões diferentes possibilitou avaliar a aplicação da técnica apresentada em duas seções com dimensões diferentes: i) uma seção menor, com  $0,30 \times 0,40$  m no canal mais estreito e ii) uma seção maior, com  $0,75 \times 1,00$  m no canal mais largo. No extremo montante de cada canal foi instalado, a 0,5 m de cada seção de estudo, um sistema de alimentação de água (Figura 1) que permitiu a aplicação de um fluxo de água constante, à superfície do solo.



**Figura 1.** Representação esquemática da instalação laboratorial utilizada durante os experimentos

Os registros termográficos (temperaturas da superfície do solo e da água) foram obtidos com recurso de uma câmera de vídeo de infravermelhos portátil Optris PI-160 (Optris GmbH), cujas características se encontram descritas na Tabela 1. A câmera converte a energia eletromagnética infravermelha invisível emitida pela superfície do solo e água, numa imagem térmica visível num monitor portátil (conjunto de pixels com valores de temperatura). A câmera de vídeo de infravermelhos foi posicionada sobre os canais de terra, na distância de 1,0 m da superfície do solo da menor seção em estudo e a 2,5 m da superfície do solo da maior seção em estudo, com direção focal perpendicular à superfície do solo e coincidente com o centro geométrico das duas seções.

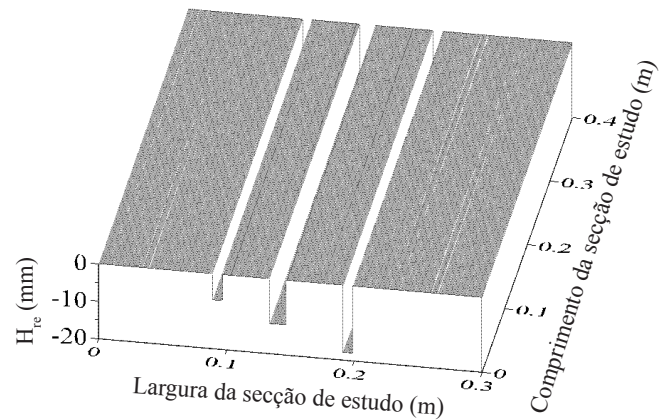
**Tabela 1.** Características da câmera de vídeo de infravermelhos, utilizada nos experimentos

Parâmetro	Unidade	Valor
Espectro de funcionamento	$\mu\text{m}$	7,5-13,0
Resolução ótica horizontal	pixel	$160 \times 120$
Resolução térmica	$^{\circ}\text{C}$	0,1
Precisão térmica	%	$\pm 2,0$
Velocidade de captação	Hz	100,0
Ângulo de visão	$^{\circ}$	$23,0 \times 17,0$
Distância focal	mm	10,0

### Cenários da microtopografia da superfície do solo

A utilização da técnica termográfica para deteção da microtopografia foi avaliada em quatro cenários diferentes: i) um cenário na menor seção em estudo e ii) três cenários na maior seção em estudo.

Na menor seção em estudo foi criado um cenário com três sulcos artificiais de diferentes dimensões (Figura 2): i) um sulco com 7 mm de profundidade e largura; ii) um sulco com 12 mm de profundidade e largura e iii) um sulco com 18 mm de profundidade e 7 mm de largura. O solo foi saturado e deixado a secar até se obter uma consistência que permitisse a criação dos sulcos artificiais, os quais foram criados comprimindo-



**Figura 2.** Representação 3D da camada mais superficial do solo de menor seção em estudo com os três sulcos artificiais ( $H_{re}$  = elevação real da superfície do solo)

se formas retangulares, de dimensão conhecida, contra a superfície do solo previamente alisada.

Na maior seção em estudo foi criada uma superfície por erosão hídrica induzida por um escoamento em lâmina de água (Figura 3A). O solo, com a superfície lisa e sem rugosidade, foi saturado e deixado a secar. Após se obter a consistência desejada aplicou-se água a temperatura ambiente com fluxo uniforme de  $0,5 \text{ L s}^{-1}$ , durante 30 min, por meio do sistema de alimentação instalado a montante do canal (Figura 1). Nesta superfície foram definidos três cenários com diferentes densidades de cobertura morta sobre a superfície do solo (Figura 3): i) solo nu, sem cobertura morta; ii) baixa densidade de cobertura morta, com  $2 \text{ t ha}^{-1}$  e iii) alta densidade de cobertura morta, com  $4 \text{ t ha}^{-1}$ . Como cobertura morta foi utilizada palha de arroz (*Oryza sativa* L. ssp. japónica). A palha de arroz, previamente secada ao ar, foi espalhada uniformemente ao longo do canal, tentando não afetar a microtopografia da superfície do solo.

### Técnica termográfica para deteção da microtopografia

Para a deteção da microtopografia da superfície do solo usando termografia, aplicou-se água quente sobre esta superfície, inicialmente a uma temperatura entre  $25\text{-}30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , por meio dos sistemas de alimentação instalados a montante dos canais. Em cada repetição foram aplicados 1,5 e 10,0 L de água quente, em temperatura entre  $85\text{-}90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , respetivamente, no canal mais estreito e no canal mais largo. A água foi aplicada com o menor fluxo possível de forma a não alterar a microtopografia da superfície do solo nem a distribuição da cobertura morta. Enquanto a água quente escoava ao longo dos canais concentrando-se nos elementos da microtopografia mais profundos (sulcos, depressões) que, conseqüentemente, vão apresentar temperaturas mais elevadas. Para cada cenário estudado, foram realizadas três repetições consecutivas, sem alterar as condições da microtopografia resultantes da repetição anterior.

A temperatura da superfície do solo e da água foi registada utilizando-se a câmera de vídeo de infravermelhos monitorizada ao longo dos experimentos, através de um monitor portátil. Os vídeos térmicos obtidos foram analisados com o objetivo de identificar diferentes elementos da microtopografia da superfície do solo e caminhos preferenciais do escoamento



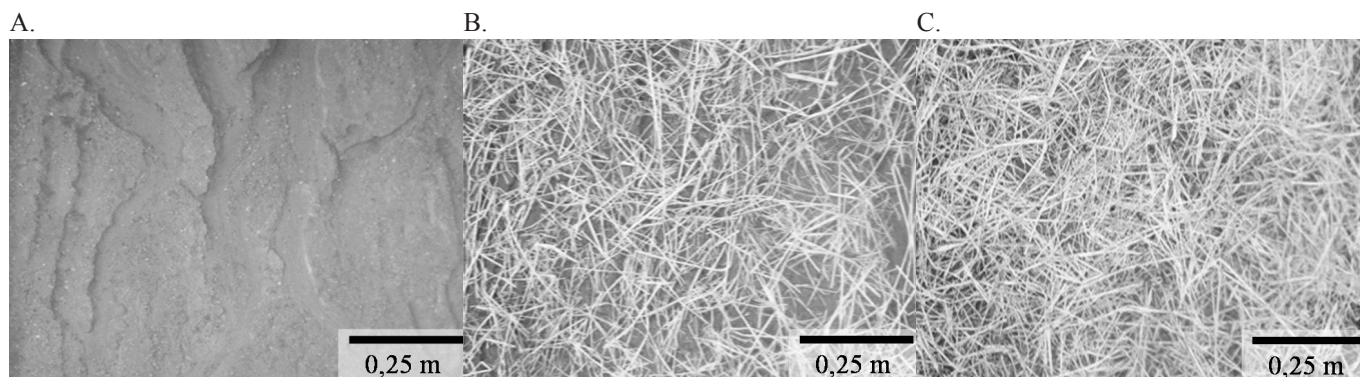


Figura 3. Fotografias (vista do topo) da maior seção em estudo: A) solo nu (sem cobertura morta), com microtopografia criada pela erosão hídrica; B) baixa densidade de cobertura morta, com 2 t ha<sup>-1</sup> e C) alta densidade de cobertura morta, com 4 t ha<sup>-1</sup>

superficial. Termogramas da superfície do solo das seções de estudo (i.e. imagens com valores de temperatura) foram extraídos dos vídeos obtidos. Os termogramas da menor seção em estudo (0,30 × 0,40 m) apresentam resolução de 360 pixels por m, no total de 15552 pixels. Os termogramas da maior seção em estudo (0,75 × 1,00 m) apresentavam resolução ótica de 160 pixels por m, no total de 19200 pixels.

Os dados de temperatura obtidos dos termogramas foram convertidos em dados de elevação da superfície do solo com o objetivo de gerar modelos 3D da microtopografia da superfície do solo. O método de conversão dos dados consistiu em quatro passos: i) medir, com precisão a elevação real de pelo menos dois pontos da superfície do solo; ii) extrair, do termograma, a temperatura correspondente a esses pontos; iii) comparar os dois tipos de dados (i.e. temperatura e elevação) dos vários pontos medidos e traçar uma regressão linear e iv) utilizar essa regressão para converter todos os dados de temperatura do termograma em dados de elevação.

Neste estudo se utilizaram 6 pontos da superfície do solo para converter os dados. Quanto maior o número de pontos utilizados para converter os dados melhor será o ajuste do modelo da microtopografia obtido com termografia ao modelo real. No entanto esta melhoria no estudo mostrou não ser significativa e não compensava o esforço e o tempo necessários para a medição precisa da elevação real de mais pontos, especialmente nas situações com cobertura morta na superfície do solo. Os pontos utilizados foram escolhidos quase aleatoriamente havendo apenas uma restrição: aproximadamente metade dos pontos deve situar-se nos elementos mais profundos da microtopografia (sulcos, depressões) e a outra metade deve situar-se nos elementos menos profundos da microtopografia (elevações).

## Resultados e Discussão

Na Figura 4 se encontra o termograma da superfície do solo obtido na menor seção em estudo, o que torna possível identificar os três sulcos criados artificialmente na superfície do solo. Estes elementos apresentam tonalidade mais clara, resultante da maior temperatura que os apresentavam. No geral, quanto maior a profundidade do sulco maior também a temperatura observada e mais clara a tonalidade apresentada nos termogramas, devido à maior concentração de água quente nesses locais. Isto ainda é mais perceptível quando se

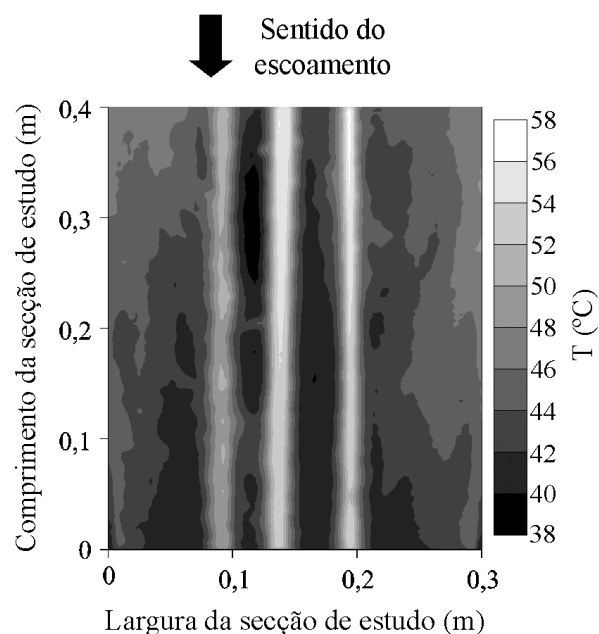
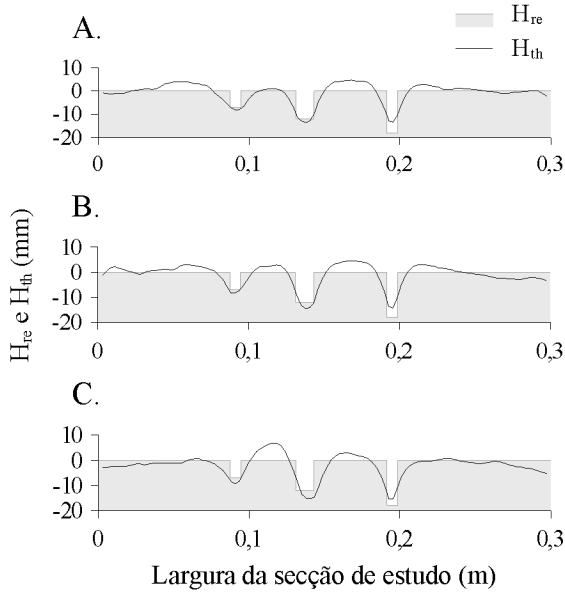


Figura 4. Termograma da superfície do solo do cenário com os sulcos criados artificialmente (menor seção em estudo)

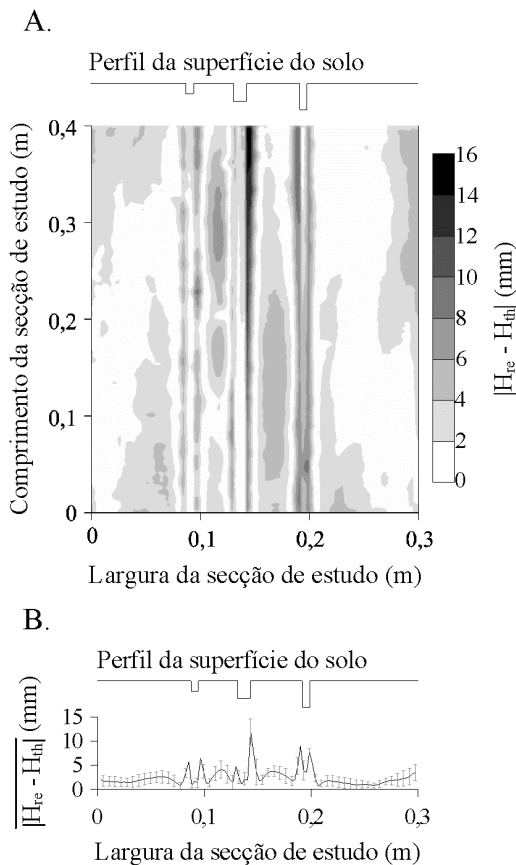
compara o sulco mais profundo (mais à direita) com o sulco menos profundo (mais à esquerda). Os pontos fora dos sulcos apresentaram temperaturas menores e tonalidade mais escura nos termogramas, resultado de uma concentração menor de água quente nos referidos locais.

Observa-se, na Figura 5, que quanto maior a profundidade real dos sulcos medida com um perfilômetro manual ( $H_{re}$ ), maior também a profundidade obtida com a termografia ( $H_{th}$ ). No entanto, a técnica não foi capaz de representar os ângulos retos dos sulcos artificiais cujo pode ter sido ocasionado pela maior difusão térmica que se verifica nesses locais, como consequência de uma área maior de superfície do solo em contato com a água quente.

Na Figura 6 pode-se observar nas zonas da superfície do solo, as maiores diferenças entre os valores reais de elevação ( $H_{re}$ ) e os valores de elevação obtidos com termografia ( $H_{th}$ ). Entre os sulcos se constata pontos nos quais a elevação obtida com termografia foi superior à elevação real, podendo ter sido originado pelo espalhamento não uniforme da água quente ao longo da seção de estudo, levando a que certos pontos da superfície apresentem temperatura inferior.

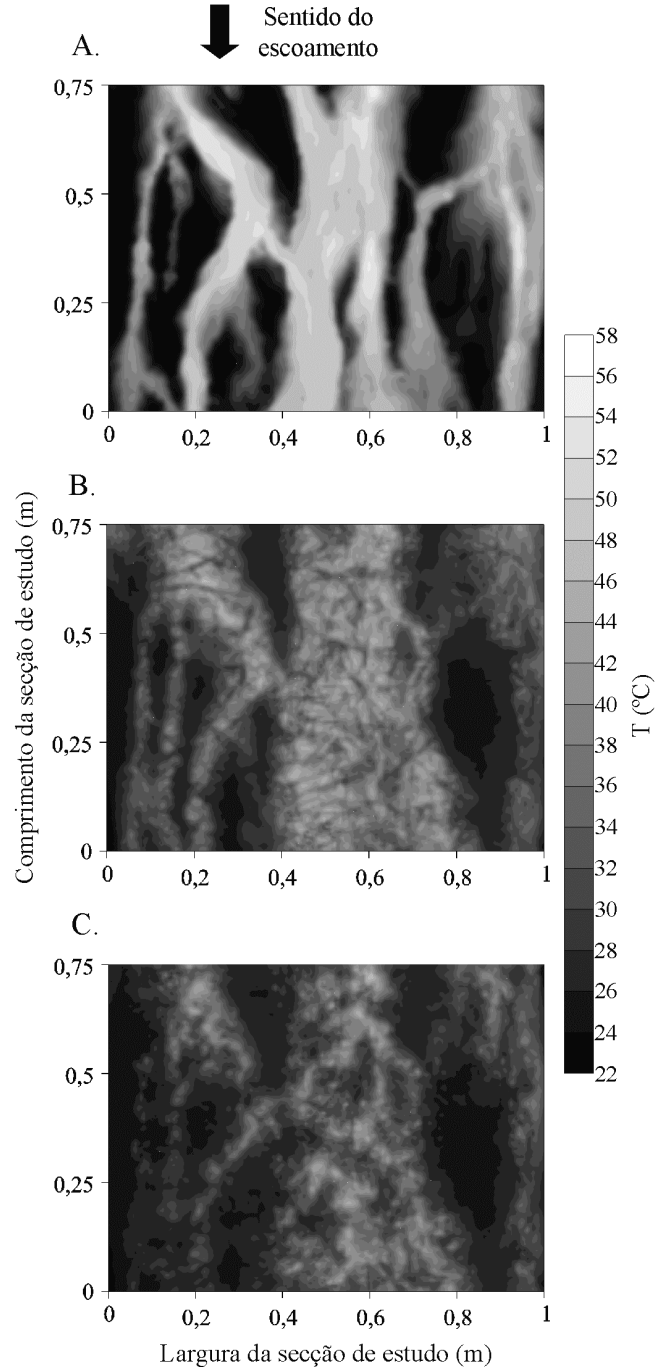


**Figura 5.** Perfis da elevação da superfície do solo (transversais ao movimento da água) medidos com um perfilômetro manual ( $H_{re}$ ) e obtidos com termografia ( $H_{th}$ ), para três cortes ao longo do comprimento da menor seção em estudo: A) 0,1 m; B) 0,2 m; e C) 0,3 m



**Figura 6.** Diferenças absolutas entre os valores reais de elevação ( $H_{re}$ ) e os valores de elevação obtidos com termografia ( $H_{th}$ ) na menor seção em estudo: A) mapa de contornos de diferenças absolutas e B) média e desvio padrão das diferenças absolutas, obtidas ao longo do perfil transversal ao movimento da água

A utilização da técnica termográfica na superfície criada por erosão hídrica, para as três condições de cobertura do solo, pode ser observada na Figura 7, observando-se que a



**Figura 7.** Termogramas da superfície do solo do cenário com microtopografia criada por erosão hídrica (maior seção em estudo): A) solo nu (sem cobertura morta); B) baixa densidade de cobertura morta, com  $2 \text{ t ha}^{-1}$  e C) alta densidade de cobertura morta, com  $4 \text{ t ha}^{-1}$

cobertura morta afeta a detecção da radiação térmica emitida pela superfície do solo. Além de ocultar a superfície do solo e afetar o registro da temperatura pela câmera de infravermelhos, a palha também pode criar barreiras ao movimento da água quente alterando os caminhos preferenciais do escoamento e a acumulação de água quente nos diversos elementos da microtopografia.

No termograma obtido no cenário de solo nu (Figura 7A) são claramente visíveis os caminhos preferenciais do escoamento sendo possível identificar os diferentes elementos da microtopografia da superfície do solo. No

cenário com 4 t ha<sup>-1</sup> de cobertura morta (Figura 7C) a palha oculta, quase na totalidade, a superfície do solo, impedindo o registro da temperatura água quente e, conseqüentemente, a detecção da microtopografia da superfície do solo. Para a densidade de cobertura morta de 2 t ha<sup>-1</sup> (Figura 7B) e apesar da interferência causada pela cobertura morta, continua a ser possível identificar os caminhos preferenciais de escoamento criados pela água quente e distinguir os diferentes elementos da microtopografia da superfície do solo.

Em geral, a média das diferenças entre os perfis transversais ao movimento de água medidos com um perfilômetro manual ( $H_{re}$ ) e obtidos com termografia ( $H_{th}$ ) aumentou com a densidade de cobertura morta (Figura 8). Para a situação de solo nu e de menor densidade de cobertura morta (2 t ha<sup>-1</sup>) a técnica termográfica apresentou resultados bastante satisfatórios. Estes dois cenários apresentaram diferenças médias entre os valores de elevação obtidos com termografia e os valores reais, muito semelhantes. No entanto, no cenário com densidade de cobertura de 4 t ha<sup>-1</sup>, se observaram diferenças entre os dois perfis muito superiores às observadas nos outros cenários.

Na Figura 9 se avalia o ajuste entre os valores reais de elevação medidos com o perfilômetro manual ( $H_{re}$ ) e os valores de elevação obtidos com termografia ( $H_{th}$ ), através do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE); observou-se em todos os cenários, uma relação direta entre os dois tipos de dados.

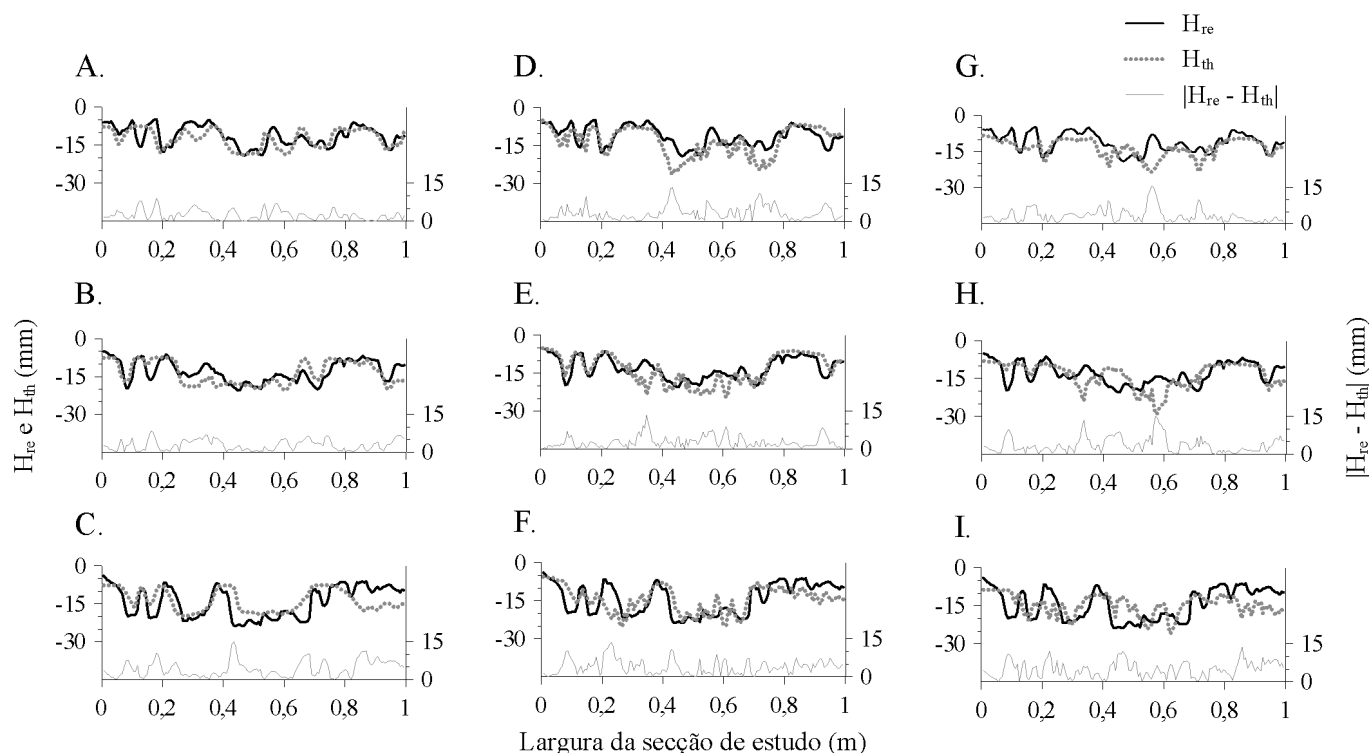
No cenário com os três sulcos artificiais (Figura 9A) quanto maior a profundidade real dos sulcos maior também a profundidade obtida com a termografia. No entanto, para

os pontos fora dos sulcos observou-se grande amplitude dos valores obtidos com a técnica termográfica.

Na superfície criada por erosão hídrica, o ajuste dos dados medidos com o perfilômetro manual aos dados obtidos com termografia apresentou tendência a diminuir com o aumento da densidade de cobertura morta. Nos cenários com solo nu (Figura 9B) e com densidade de cobertura de 2 t ha<sup>-1</sup> (Figura 9C) o ajuste dos dois tipos de dados foi muito semelhante, mesmo com o coeficiente de correlação ( $r^2$ ) chegando a ser superior no cenário com densidade de cobertura de 2 t ha<sup>-1</sup>. No entanto, no cenário com densidade de cobertura de 4 t ha<sup>-1</sup> (Figura 9D) observou-se uma diminuição muito elevada do ajuste dos dados, além de diminuição do coeficiente de correlação ( $r^2$ ) e aumento quadrado da raiz do erro médio quadrático (RMSE).

Verificou-se, durante vários experimentos, que a aplicação de água quente sobre a superfície do solo pode favorecer a desagregação do solo por erosão hídrica e afetar a microtopografia da superfície. Mesmo em situações de cobertura morta nas quais esses efeitos destrutivos são atenuados, a técnica apresentada deve ser aplicada com cuidado, através do menor volume de água quente necessário para que a técnica funcione.

A aplicação desta técnica pressupõe que as características físicas da superfície do solo da área de estudo são homogêneas. Solos com diferentes características (e.g. permeabilidade, compactação) podem absorver água quente em diferentes quantidades, podendo levar a diferentes temperaturas da superfície do solo, questão que será abordada em trabalhos futuros.



**Figura 8.** Perfis da elevação da superfície com microtopografia criada por erosão hídrica (transversais ao movimento da água) medidos com um perfilômetro manual ( $H_{re}$ ) e obtidos com termografia ( $H_{th}$ ) para as três densidades cobertura morta [A), B), C) solo nu; D), E), F) densidade de 2 t ha<sup>-1</sup> e G), H), I) densidade de 4 t ha<sup>-1</sup>] e para três cortes ao longo do comprimento da maior seção em estudo [A), D), G) 0,3 m; B), E), H) 0,6 m e C), F), I) 0,9 m]



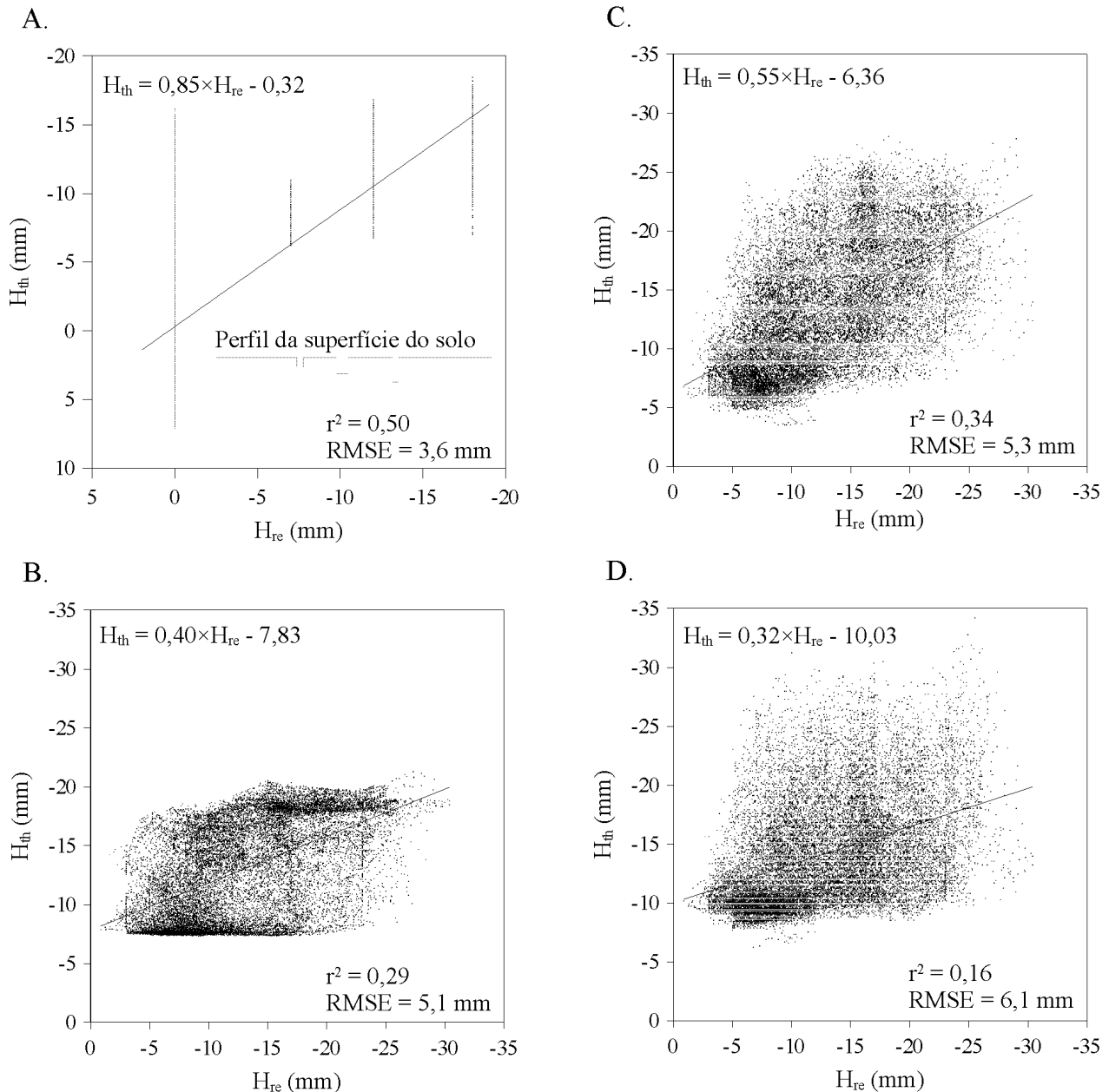


Figura 9. Comparação entre os valores reais de elevação medidos com o perfilômetro manual ( $H_{re}$ ) e os valores de elevação obtidos com termografia ( $H_{th}$ ), para o cenário com sulcos artificiais, cuja microtopografia real só apresenta quatro valores [A]) e para os cenários com microtopografia criada por erosão hídrica e três densidade de cobertura morta [B) solo nu; C) densidade de 2 t ha<sup>-1</sup> e D) densidade de 4 t ha<sup>-1</sup>

## Conclusões

A performance da técnica apresentada e a facilidade de aplicação permitem concluir que a termografia pode ser útil na detecção da microtopografia da superfície do solo, mesmo na presença de cobertura morta sobre a superfície do solo. A detecção da radiação térmica emitida pela superfície do solo foi bastante afetada pela maior densidade de cobertura morta (4 t ha<sup>-1</sup>), originando uma diminuição da performance da técnica estudada.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT (Portugal) pelo financiamento do Projeto de Investigação PTDC/ECM/105446/2008 e

pelo financiamento da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/92816/2013 do primeiro autor. Ao CNPq (Brasil) pelo financiamento do Projeto Universal e do Projeto de Pesquisador Visitante Especial (PVE) do programa Ciência sem Fronteiras, do segundo autor. Os autores agradecem, também, à Bolsista Ana Raquel Quinteiro, pela ajuda nos trabalhos laboratoriais realizados.

## Literatura Citada

Aguilar, M. A.; Aguilar, F. J.; Negreiros, J. Off-the-shelf laser scanning and close-range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief. *Biosystems Engineering*, v.103, n.4, p.504-517, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.010>>.

- Allmaras, R. R.; Burwell, R. E.; Larson, W. E.; Holt, R. F. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. Washington: Agricultural Research Service, 1966. 22p. (U.S. Department of Agriculture, Conservation Research Report n.7). <<https://archive.org/details/totalporosityran07allm>>. 29 Mai. 2013.
- Bertolani, F. C.; Paz González, A.; Lado Liñares, M.; Vidal Vázquez, E.; Miranda, J. G. V. Variabilidade espacial da rugosidade superficial do solo medida com rugosímetros de agulhas e laser. *Bragantia*, v.59, n.2, p.227-234, 2000. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-8705200000200015>>.
- Carvalho Filho, A.; Centurion, J. F.; Silva, R. P.; Furlani, C. E. A.; Carvalho, L. C. C. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. *Engenharia Agrícola*, v.27, n.1, p.229-237, 2007. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162007000100017>>.
- Castro, L. G.; Cogo, N. P.; Volk, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n.2, p.339-352, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000200014>>.
- Darboux, F.; Huang, C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? *Soil Science Society of America Journal*, v.69, n.3, p.748-756, 2005. <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2003.0311>>.
- Eitel, J. U. H.; Williams, C. J.; Vierling, L. A.; Al-Hamdan, O. Z.; Pierson, F. B. Suitability of terrestrial laser scanning for studying surface roughness effects on concentrated flow erosion processes in rangelands. *Catena*, v.87, n.3, p.398-407, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2011.07.009>>.
- Favis-Mortlock, D. T.; Boardman, J.; Parsons, A. J.; Lascelles, B. Emergence and erosion: a model for rill initiation and development. *Hydrological Processes*, v.14, n.11-12, p.2173-2205, 2000. <[http://dx.doi.org/10.1002/1099-1085\(20000815/30\)14:11/12<2173::AID-HYP61>3.0.CO;2-6](http://dx.doi.org/10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<2173::AID-HYP61>3.0.CO;2-6)>.
- Garcia Moreno, R.; Díaz Álvarez, M. C.; Tarquis, A. M.; Paz González, A.; Saa Requejo, A. Shadow analysis of soil surface roughness compared to the chain set method and direct measurement of micro-relief. *Biogeosciences*, v.7, n.1, p.1021-1055, 2010. <<http://dx.doi.org/10.5194/bgd-7-1021-2010>>.
- Hofer, M.; Lehmann, P.; Stähli, M.; Seifert, S.; Krafczyk, M. Two approaches to modeling the initiation and development of rills in a man-made catchment. *Water Resources Research*, v.48, n.1, W01531, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1029/2011WR010719>>.
- Jester, W.; Klik, A. Soil surface roughness measurement-methods, applicability, and surface representation. *Catena*, v.64, n.2-3, p.174-192, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.005>>.
- Lima, J. L. M. P. de; 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. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.011>>.
- Lima, J. L. M. P. de; Abrantes, J. R. C. B. Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.39, n.10, p.1293-1300, 2014b. <<http://dx.doi.org/10.1002/esp.3523>>.
- Lima, J. L. M. P. de; Dinis, P. A.; Souza, C. S.; de Lima, M. I. P.; Cunha, P. P.; Azevedo, J. M.; Singh, V.P.; Abreu, J.M. Patterns of grain-size temporal variation of sediment transported by overland flow associated with moving storms: interpreting soil flume experiments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v.11, n.9, p.2605-2615, 2011. <<http://dx.doi.org/10.5194/nhess-11-2605-2011>>.
- Lima, J. L. M. P.; Singh, V. P.; Lima, M. I. P. de. The influence of storm movement on water erosion: storm direction and velocity effects. *Catena*, v.52, n.1, p.39-56, 2003. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00149-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00149-2)>.
- Lima, J. L. M. P. de; Souza, C. S.; Singh, V. P. Granulometric characterization of sediments transported by surface runoff generated by moving storms. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.15, n.6, p. 999-1011, 2008. <<http://dx.doi.org/10.5194/npg-15-999-2008>>.
- Lima, J. L. M. P. de; Tavares, P.; Singh, V. P.; de Lima, M. I. P. Investigating the nonlinear response of soil loss to storm direction using a circular soil flume. *Geoderma*, v.152, n.1-2, p.9-15, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.004>>.
- Lima, M. I. P. de; Santo, F. E., Ramos, A. M.; de Lima, J. L. M. P. Recent changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in mainland Portugal, in the period 1941-2007. *Atmospheric Research*, v.127, p.195-209, 2013. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.001>>.
- Montenegro, A. A. A.; Abrantes, J. R. C. B.; Lima, J. L. M. P. de; Singh, V. P.; Santos T. E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, v.109, p.139-149, 2013a. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.018>>.
- Montenegro, A. A. A.; Lima, J. L. M. P. de; Abrantes, J. R. C. B.; Santos, T. E. M. Impact of mulching on soil and water conservation in semiarid catchment: simulated rainfall in the Field and in the Laboratory. *Die Bodenkultur - Journal for Land Management, Food and Environment*, v.64, n.3-4, p.79-85, 2013b. <<http://www.boku.ac.at/en/research-services/forschungskommunikation/die-bodenkultur-journal/contents/vol-64-2013/vol-64-3-4/montenegro/#c89101>>. 31 Mar. 2014.
- Panachuki, E.; Bertol, I.; Alves Sobrinho, T.; Vitorino, A. C. T.; de Souza, C. M. A.; Urchei, M. A. Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de manejo e influenciada por chuva artificial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, n.2, p.443-451, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200018>>.
- Paz-Ferreiro, J.; Bertol, I.; Vidal Vázquez, E. Quantification of tillage, plant cover, and cumulative rainfall effects on soil surface microrelief by statistical, geostatistical and fractal indices. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.15, n.4, p.575-590, 2008. <<http://dx.doi.org/10.5194/npg-15-575-2008>>.
- 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. <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7840>>.



- Price, J.; Rochefort, L.; Quinty, F. Energy and moisture considerations on cutover peatlands: surface microtopography, mulch cover and Sphagnum regeneration. *Ecological Engineering*, v.10, n.4, p.293-312, 1998. <[http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00046-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00046-9)>.
- Rieke-Zapp, D. H.; Nearing, M. A. Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion. *The Photogrammetric Record*, v.20, n.109, p.69-87, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2005.00305.x>>.
- Santos, T. E. M.; Montenegro, A. A. A. Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.8, p.971-880, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000800009>>.
- Santos, T. E. M.; Montenegro, A. A. A.; Silva Jr., V. P.; Montenegro, S. M. G. L. Erosão hídrica e perda de carbono orgânico em diferentes tipos de cobertura do solo no semiárido, em condições de chuva simulada. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.13, n.2, p.29-34, 2008. <[https://www.abrh.org.br/sgecv3/UserFiles/Sumarios/f0e27b17f122a681206db1103f63b20f\\_9905eb197fd58519fda9835da2b52c89.pdf](https://www.abrh.org.br/sgecv3/UserFiles/Sumarios/f0e27b17f122a681206db1103f63b20f_9905eb197fd58519fda9835da2b52c89.pdf)>. 29 Mai. 2013.
- 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. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.013>>.
- Siqueira, G. M.; Dafonte, J. D.; Vidal Vázquez, E.; Armesto, M. V. Distribuição espacial da rugosidade do solo em microparcelas experimentais sob diferentes intensidades de chuva simulada. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.7, n.4, p.671-679, 2012. <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v7i4a1783>>.
- Vidal Vázquez, E.; Bertol, I.; Siqueira, G. M.; Paz-Ferreiro, J.; Dafonte, J. D. Evolution of the soil surface roughness using geostatistical analysis. *Bragantia*, v.69, supl., p.141-152, 2010a. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052010000500015>>.
- Vidal Vázquez, E.; Vivas Miranda, J. G.; Paz González, A. Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. *Ecological Modelling*, v.182, n.3-4, p.337-353, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.012>>.
- Vidal Vázquez, E.; Vivas Miranda, J. G.; Paz-Ferreiro, J. A multifractal approach to characterize cumulative rainfall and tillage effects on soil surface micro-topography and to predict depression storage. *Biogeosciences*, v.7, n.10, p.2989-3004, 2010b. <<http://dx.doi.org/10.5194/bg-7-2989-2010>>.
- Volk, L. B. S.; Cogo, N. P. Relações entre tamanho de sedimentos erodidos, velocidade da enxurrada, rugosidade superficial criada pelo preparo e tamanho de agregados em solo submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, n.5, p. 671-679, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000500036>>.