

## Variação espacial da resistividade elétrica em terraços agrícolas: Correlação estatística entre TRE e algoritmos de direção de fluxos.<sup>1</sup>

### Electrical resistivity spatial variation in agriculture terraces: Statistical correlation with ERT and flow direction algorithms<sup>1</sup>

Joana Fernandes <sup>a</sup>  
*joanafcfernandes@gmail.com*

Carlos Bateira <sup>b</sup>  
*carlosbateira@gmail.com*

António Costa <sup>a</sup>  
*afonso.costa@gmail.com*

Bruno Fonseca <sup>a</sup>  
*brunopomarelhos@hotmail.com*

Rui Moura <sup>c</sup>  
*rmmoura@fc.up.pt*

José Gonçalves <sup>c</sup>  
*jagoncal@fc.up.pt*

<sup>a</sup>*Faculdade de Letras da Universidade do Porto*

<sup>b</sup>*Riskam, CEG, IGOT, ULisboa/FLUP-UP*

<sup>c</sup>*Centro de Geologia, Universidade do Porto*

#### ABSTRACT

The construction of terraces, in the Douro Region, with earthen embankments rises a set of problems related to the hydrological processes. The main objective of this study

---

<sup>1</sup> Trabalho desenvolvido no âmbito do projeto de I&DT n.º 03495 – CLOUDMAPPER, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional da União Europeia (FEDER), através do Portugal 2020 (P2020), ao abrigo do programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020)

is the evaluation of the electrical resistivity spatial variation in agriculture terraces at Douro valley (Portugal).

To achieve this objective two variables are analysed, the soil electrical resistivity and the flow direction algorithms. In field survey, 13 electrical resistivity profiles were recorded. The contributing area calculated with the algorithms  $D^\infty$  (Deterministic Infinity Flow) and MFD (Multiple Flow Direction), are the base of the internal runoff modelling, both supported by the digital elevation model with a special resolution of  $1m^2$ .

Was established a correlation between the spatial variation of the soil electrical resistivity represented by standard deviation electrical resistivity of each profile and the average value of contributing area coincident with each profile.

The electrical resistivity standard deviation seems to be moderately good correlated for the  $D^\infty$  algorithm at about 1m of depth and has a good correlation at 1,5m to 2m of depth with the MFD algorithm. The results analysis shows a significant positive statistical correlation between electrical resistivity standard deviation and the contributing areas (MFD and  $D^\infty$ ) depending on the soil depths.

**Palavras-chave:** Tomografia de Resistividade Elétrica; Multiple Flow Direction; D-Infinity; Variação Espacial da Resistividade Elétrica; Terraços Agrícolas.

**Keywords:** Electrical Resistivity Tomography; Multiple Flow Direction; D-Infinity; Electrical Resistivity Spatial Variation; Agricultural Terraces.

## INTRODUÇÃO

A evolução na Região Demarcada do Douro, no que se refere ao tipo de armação de terreno, baseia-se na substituição de terraços suportados em muros de pedra por taludes de terra. Os taludes de terra assumem uma inclinação variável superior a 100% e inferior a 175%. Esta alteração divide a plataforma do terraço em duas secções, uma escavada e outra de aterro com materiais friáveis derivados de rochas metassedimentares, removidos da secção escavada. Esta evolução promove um conjunto de problemas relacionados com a variação da estrutura e circulação de água no solo.

A tomografia de resistividade elétrica (TRE) é um método não-invasivo que permite identificar as propriedades do solo (Samoüelian *et al.*, 2005). Este é um método que tem sido utilizado em terraços agrícolas. Dafonte *et al.* (2013) aplicou a TRE para determinar o teor de água no solo. Rossi *et al.*, (2013) utilizou a TRE para estimar a variabilidade espacial do crescimento vegetativo das plantas, enquanto Brillante *et al.*, (2015) para determinar a água no solo, disponível para a planta. Ainda, García-Tomillo *et al.*, (2015) elaborou um estudo de compactação do solo em terraços agrícolas com recurso a este método. Estes autores concluíram que a tomografia de resistividade elétrica é um método adequado para a determinação de teor de água no solo bem como na relação entre planta e solo e representa um método eficaz no apoio à gestão da agricultura.

Os algoritmos de direção de fluxo, modelados a partir de modelos de elevação digital, têm sido amplamente aplicadas em diversos estudos, destacam-se alguns autores que, recentemente, utilizaram os algoritmos MFD e  $D^\infty$  para o estudo de suscetibilidade a movimentos de vertente (Sarkar *et al.*, 2016; Arkgun e Erkan, 2016; Rabonza *et al.*, 2016; Aristizábal *et al.*, 2015; Teixeira *et al.*, 2015; Nery e Vieira, 2015).

O objetivo principal, deste trabalho, consiste em cartografar espacialmente a variação da resistividade elétrica, representada pela correlação estatística entre

o desvio padrão da resistividade elétrica e a média das áreas contributivas modeladas a partir dos algoritmos MFD e  $D^\infty$ . A área de estudo compreende uma bacia hidrográfica, com uma área de 61.26 ha, na Quinta de S. Luiz, localizada na região Demarcada do Douro, (Adorigo, Tabuaço).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os algoritmos de áreas contributivas, MFD e  $D^\infty$ , foram produzidos no software SAGA GIS 2.1.2 com recurso à ferramenta “*Extended Neighbourhood – Catchment Areas (parallel)*”. O modelo digital de elevação apresentou-se como o dado de base para o processamento dos algoritmos. Assim sendo, o MDE foi criado a partir de fotografias aéreas adquiridas num voo a 5000 m de altitude, com uma máquina fotográfica digital. O processo seguiu através do método de estero-correlação automática entre as imagens com resolução de 50 cm de pixel, assegurando uma sobreposição longitudinal de 60% e lateral de 30%. Posteriormente, o MDE foi ortorretificado recorrendo a 6 pontos de controlo, obtidos a partir de um GPS de dupla frequência com modo cinemático em tempo real. A partir do procedimento “*stereomaching*” obteve-se uma nuvem de pontos densa e seguidamente uma *grid* regular DEM com espaçamento de 1 metro. A totalidade do processo fotogramétrico foi realizado no software Agisoft PhotoScan.

Foram realizados 13 perfis de resistividade elétrica, na área de estudo, após episódios chuvosos, na plataforma dos terraços agrícolas em vertentes côncavas e convexas. Cada perfil detinha a dimensão de 60 metros, seguindo o método de Wenner, para 1, 2, 3 e 4, metros de espaçamento entre os eléctrodos, alcançando profundidades do solo de 0.5, 1, 1.5, e 2 metros, respetivamente. O processo foi realizado, com recurso a um resistímetro ABEM SAS 300C. Na generalidade dos perfis, (3, 4, 5, 6, 7, 8 e 12) demonstram valores de resistividade elétrica superiores a 100  $\Omega$ .m, à superfície, (0.5 metros de profundidade), estes valores denotam a presença de xisto desagregado, de 24.6% de cascalho, (Fernandes, 2017). Na camada de 1.5 metros de

profundidade os valores de resistividade elétrica variam entre 2 e 80  $\Omega$ .m. Esta camada evidencia uma maior porosidade e, revela uma matriz dispersa de solo argiloso (64,5%) e pequenas raízes de vinha o que permite uma maior circulação de água, (Fernandes, 2017). Os perfis 1, 2, 7, 9, 10 e 11 denotam uma maior saturação do solo, destacando-se os perfis 9, 10 e 11 nos quais os valores nessa camada não excedem 10  $\Omega$ .m, (Fig.1). A 2 metros de profundidade, onde predomina o substrato rochoso, todos os perfis apresentam valores mais diminutos de resistividade elétrica, excetuando os perfis 3, 4 e 7 (onde os valores variam até 200  $\Omega$ .m), os valores de resistividade não excedem 60  $\Omega$ .m, (Fig.1).

De forma a processar e representar os dados de resistividade elétrica utilizou-se o software ZondRes2d. Os parâmetros introduzidos, para a obter os modelos de inversão de resistividade elétrica, compreenderam 10 cm de resolução espacial em 20 camadas com fator vertical de 1. Assim sendo, recorreu-se ao algoritmo “Marquardt” com 10 interações e um erro de 0.3 RMS. Para obter a representação dos perfis optou-se pela visualização em blocos (*Block Seccion*).

Para obter a correlação estatística entre as áreas contributivas e a resistividade elétrica, analisámos os perfis de resistividade para as profundidades de 1, 1.5 e 2 metros apenas nas áreas contributivas inferiores a 400 m<sup>2</sup>, excluindo, assim, as principais linhas de escoamento superficial. Por conseguinte, para cada perfil de resistividade foi calculado o desvio padrão, do modelo de inversão, e a média das áreas contributivas. Os dados obtidos foram organizados em gráficos de dispersão projetados com uma linha de tendência potencial e com o coeficiente de determinação múltipla R<sup>2</sup> (Healey, 2009).

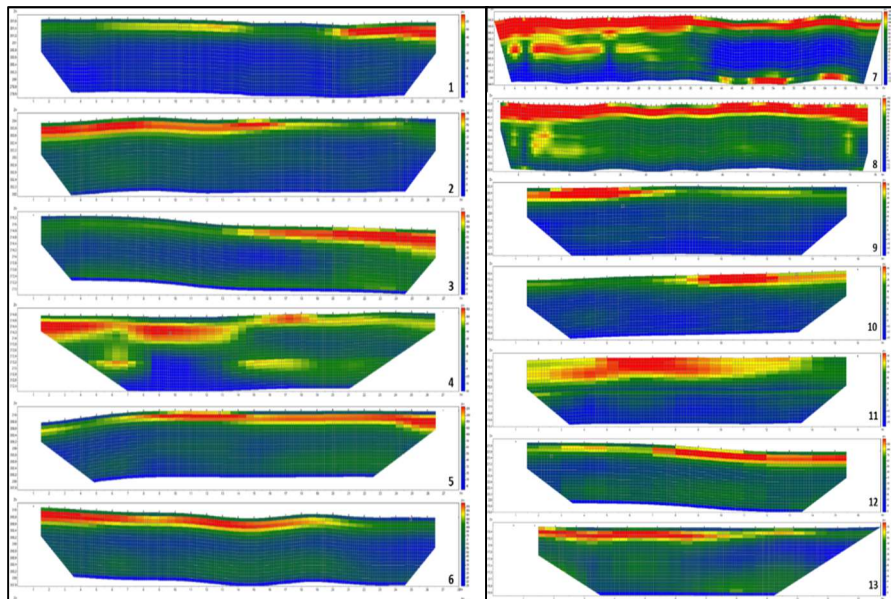


Figura 1 –Perfis de Resistividade Elétrica

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados revelaram uma relação direta entre a tomografia de resistividade elétrica e as áreas contributivas, com características relevantes referentes à variação espacial da resistividade elétrica que representam uma ferramenta de interpretação da humidade do solo.

A modelação dos algoritmos MFD e  $D^\infty$  revela que os valores mais elevados concentram-se nas linhas de água principais e sobretudo, na secção inferior da bacia hidrográfica. Contudo, nas secções média e superior da bacia hidrográfica, o MFD modela uma drenagem mais representativa dos cursos de água principais enquanto, o  $D^\infty$  modela o fluxo interno das linhas de água de primeira ordem mantendo extensas áreas com valores relativamente baixos, (Fig. 2, 3 e 4).

No que se refere à correlação estatística entre o desvio padrão da resistividade elétrica e a média das áreas contributivas, o  $D^\infty$  apresentou um  $R^2$  de 0.6955 para a camada de 1 m de profundidade, porém o MFD relevou valores mais diminutos com um  $R^2$  de 0.6229, para a mesma camada, (Fig. 2). Estes valores explicam-se na medida em que, esta camada do solo apresenta elevada desagregação, devido ao processo de construção dos terraços agrícolas, e por conseguinte, a elevada presença de cascalho explica a fraca variação dos valores de resistividade elétrica. Neste sentido, existem áreas mais extensas com valores baixos de resistividade elétrica e por isso o  $D^\infty$  adequa-se. Por outro lado, o MFD tem tendência para generalizar os elementos do terreno simulando um fluxo com maior conectividade (Quinn *et al.*, 1991). Este tipo de conectividade relaciona-se com os cursos de água nas camadas mais profundas do solo, onde o solo é mais heterogéneo. Este facto é demonstrado nos resultados de correlação para as camadas de 1.5 e 2 metros de profundidade em que o MFD revela um  $R^2$  de 0.7269 e 0.7555, respetivamente. Em contraste o  $D^\infty$  apresenta valores mais reduzidos com um  $R^2$  de 0.6477 e 0.5314 para 1.5 e 2 metros, respetivamente, (Fig. 3 e 4). Estes resultados demonstram a eficácia do MFD na modelação do fluxo subsuperficial, evidenciando os caminhos preferenciais que influenciam a circulação de água no solo (Tarboton, 1997).

Em suma, o algoritmo  $D^\infty$  possui uma correlação direta com a variação da humidade do solo na primeira camada de solo, (1 metro de profundidade). Esta camada suporta uma modificação intensa decorrente do processo de construção de terraços conferindo ao solo uma estrutura desagregada. Por outro lado, o MFD apresenta uma boa correlação com a variação da humidade do solo, nas camadas mais profundas, (1.5 e 2 m), nestas camadas os caminhos preferenciais são as principais características do escoamento interno e, como tal apresentam-se melhor representados pelo MFD.

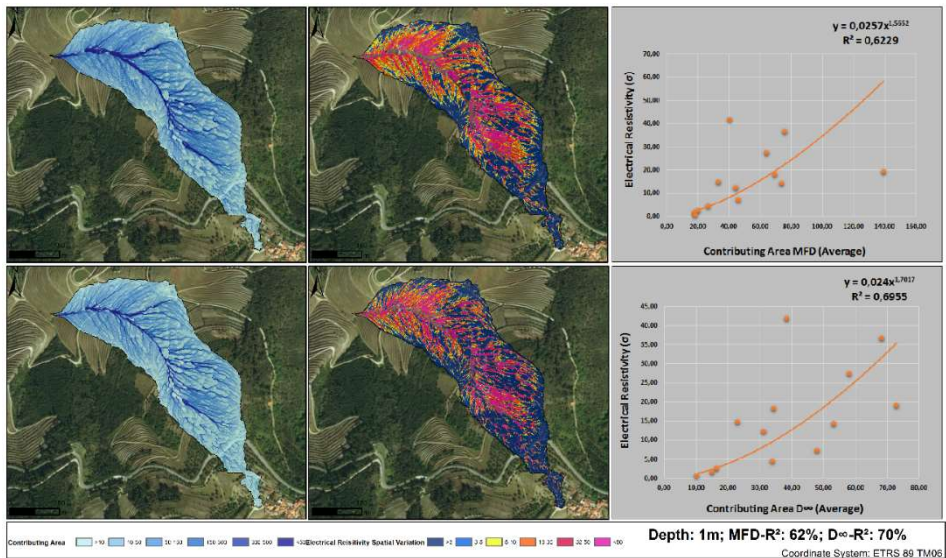


Figura 2 - Variação espacial da resistividade elétrica a 1 metro de profundidade.

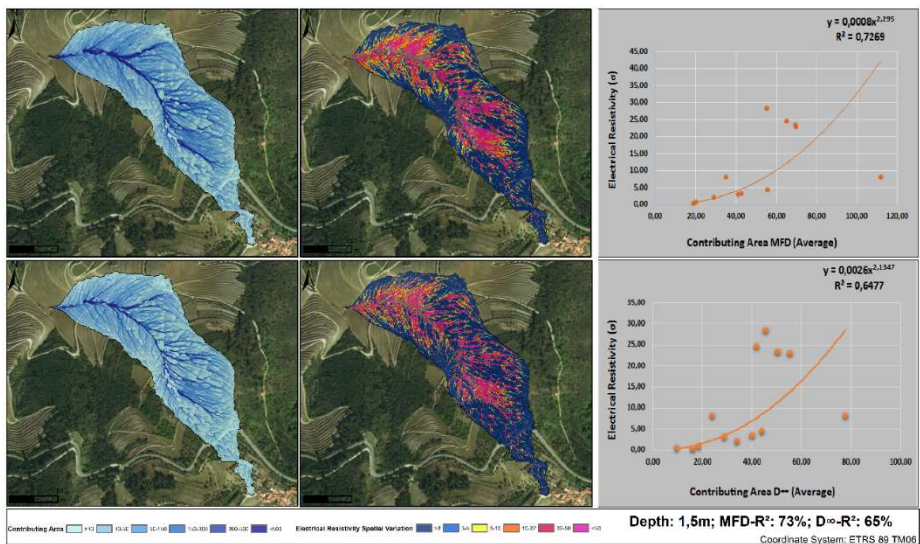


Figura 3 - Variação espacial da resistividade elétrica a 1.5 metros de profundidade



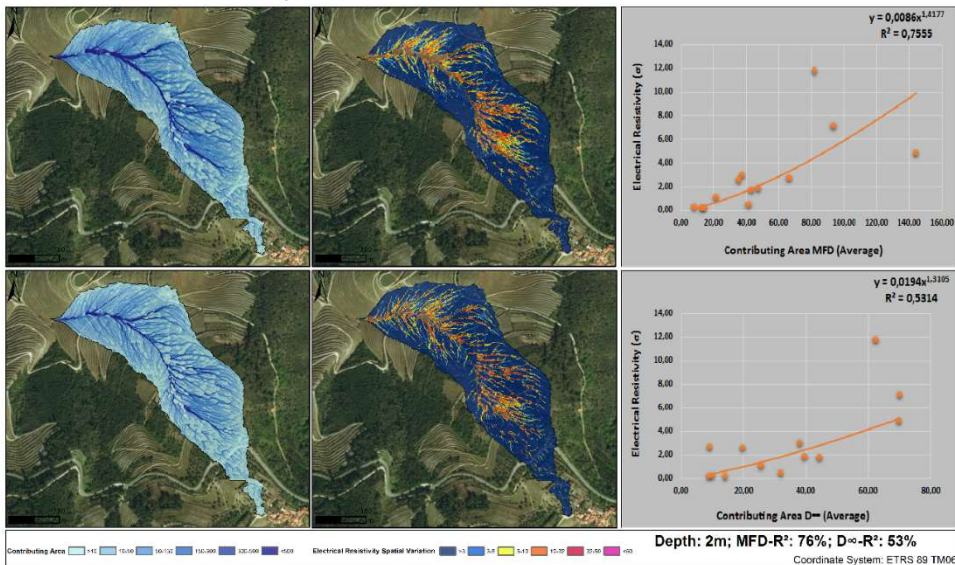


Figura 4 - Variação espacial da resistividade elétrica a 2 metros de profundidade.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho sugere que, a tomografia de resistividade elétrica quando aplicada ao estudo da estrutura do solo fornece informações precisas para a caracterização dos terraços agrícolas e pode ser utilizada para interpretar a variação da humidade do solo. A informação obtida a partir da variação da resistividade elétrica torna-se essencial para a identificação dos algoritmos de direção do fluxo a utilizar na análise e modelação hidro-geomorfológica.

A partir da metodologia aplicada os resultados demonstram uma correlação positiva entre o desvio padrão da resistividade elétrica e a média das áreas contributivas na área do Alto Douro Vinhateiro. A correlação varia em profundidade e depende do algoritmo de direção de fluxo.

Ressaltamos que, para cada estrutura de solo, é necessário desenvolver uma análise de campo prévia, de forma a identificar o modelo hidrológico mais adequado para representação cartográfica.

De forma a obter melhores resultados, seria interessante obter mais dados de resistividade elétrica combinados com modelos digitais de elevação com maior resolução. Salienta-se que, com a utilização de um modelo digital de elevação mais detalhado torna-se necessário eleger um modelo hidrológico, de áreas contributivas, adequado à representação da topografia de forma mais detalhada.

Salienta-se que, para este estudo, dados adicionais de resistividade elétrica e medições de humidade do solo poderiam fortalecer a metodologia apresentada. Contudo, esta metodologia demonstrou ser adequada, quando aplicada à região do Vale do Douro, porém necessita de confirmação com outras regiões que apresentem características hidrogeomorfológicas distintas.

## REFERÊNCIAS

Akgun, A.; Erkan, O. (2016). Landslide susceptibility mapping by geographical information system-based multivariate statistical and deterministic models: in an artificial reservoir area at Northern Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), pp. 1-15. DOI: 10.1007/s12517-015-2142-7

Aristizábal, E.; García, E.; Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, 78(1), pp. 621-634. DOI: 10.1007/s11069-015-1736-4

Brillante, L.; Mathieu, O.; Bois, B.; van Leeuwen C.; Lévêque, J. (2015) The use of soil electrical resistivity to monitor plant and soil water relationships in vineyards. *Soil*, 1, pp. 273-286. DOI: 10.5194/soil-1-273-2015

Dafonte, J. D.; Raposo, J. R.; Valcárcel, M.; Fandiño, M.; Martínez E. M.; Rey, B. J.; Cancela, J. J.; (2013). Utilización de la tomografía eléctrica resistiva para estimar el contenido de agua en el suelo en viña bajo diferentes sistemas de riego. pp. 57-62. *Estudios en la Zona No Saturada del Suelo*, Vol. XI - ZNS'13. Universidade de Santiago de Compostela.

García-Tomillo, A.; Figueiredo, T.; Dafonte, J. D.; Almeida, A.; Paz-González, A. (2015) Estudio com tomografía de resistividad eléctrica del efecto del tráfico de maquinaria en un suelo agrícola. Estudios en la Zona No Saturada del Suelo, Vol. XII, pp. 1-5. ISBN: 978-84-16133-91-8

Healey, J. (2009). The Essentials of Statistics: A Tool for Social Research (Second ed.) Belmont: Cengage Learning.

Nery, T. D.; Vieira, B. C. (2015). Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74(2), pp. 369-378. DOI: 0.1007/s10064-014-0622-8

Quinn, P.; Beven, K.; Chevalier, P.; Planchon, O. (1991) The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. Hydrological Processes, 5, pp. 59–79. DOI: 10.1002/hyp.3360050106

Rabonza, M. L.; Felix, R. P.; Lagmay, A. M. F. A.; Eco, R. N. C.; Ortiz, I. J. G.; Aquino, D. T. (2016). Shallow landslide susceptibility mapping using high-resolution topography for areas devastated by super typhoon Haiyan. Landslides, 13(1), pp. 201-210. DOI: 10.1007/s10346-015-0626-x

Rossi, R.; Pollice, A.; Diago, M.; Oliveira, M.; Millan, B.; Bitella, G.; Amato, M.; Tardaguila, J. (2013) Using an automatic resistivity profiler soil sensor on-the-go in precision viticulture. Sensors, 13, pp. 1121-1136. DOI: 10.3390/s130101121

Samouëlian, A.; Cousin I.; Tabbagh A.; Bruand A; Richard G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. Soil Tillage Research. 83, pp. 173-193. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>

Sarkar, S.; Roy, A. K.; Raha, P. (2016). Deterministic approach for susceptibility assessment of shallow debris slide in the Darjeeling Himalayas, India. Catena, 142, pp. 36-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.009>

Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*, 33(2), pp. 309-319. DOI: 10.1029/96WR03137

Teixeira, M.; Bateira, C.; Marques, F.; Vieira, B. (2015). Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. *Landslides*, 12(3), pp. 455-468. DOI: 10.1007/s10346-014-0494-9