

# Contributo do Método Electromagnético no Dominio do Tempo (TDEM) na prospecção hidrogeológica

## Caso de estudo na Ilha do Fogo, Cabo Verde

### Contribution of the Electromagnetic Method in the Time Domain (TDEM) in hydrogeological prospecting Case study on Fogo Island, Cape Verde

João DUARTE<sup>1</sup>, António LOBO DE PINA<sup>2</sup>, Fernando FIGUEIREDO<sup>3</sup>, Marco CUNHA<sup>4</sup>, José CARVALHO<sup>5</sup>, Sónia VICTORIA<sup>6</sup>

<sup>1</sup> IQGeo – Serviços, Lda. e Centro de Geociências da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade de Coimbra, Portugal. joao.aduarte@iqgeo.pt

<sup>2</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Cabo Verde. antonio.pina@docente.unicv.edu.cv

<sup>3</sup> Centro de Geociências da UC e Departamento de Ciências da Terra da UC, fpedro@dct.uc.pt

<sup>4</sup> GeoSurveys – Consultores em Geofísica, Lda., Rua Narciso Espírito Santo 8, Maianga, Luanda, Angola. marcoaureliocunha@gmail.com

<sup>5</sup> Centro de Geociências da UC, jose.carvalho.geo@gmail.com

<sup>6</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Cabo Verde. sonia.silva@docente.unicv.edu.cv

**RESUMO:** A utilização do Método Eletromagnético no Dominio do Tempo [TDEM], contribui de uma forma significativa para localização de estruturas geológicas em profundidade e definição da sua geometria. Os modelos geológicos/estruturais obtidos por processamento dos dados da prospecção geofísica complementados com a integração de outra informação e metodologias, permitem identificar e localizar estruturas geológicas com potencial para a exploração de águas subterrâneas. A elaboração de modelos obtidos através do método TDEM permite ter uma perspetiva das estruturas geológicas, assim como identificar e interpretar a relação espacial entre elas, contribuindo desta forma para um melhor conhecimento da subsuperfície da cratera do vulcão da Ilha do Fogo. Em Cabo Verde, arquipélago com precipitações na generalidade fracas, cujos valores médios não ultrapassam 300mm/ano para as zonas situadas abaixo de 400 metros e 700mm/ano para as zonas situadas a mais de 500 metros de altitude (INGRH, 2000, Lima e Garcia, 2011), os recursos hídricos subterrâneos desempenham um papel fundamental, constituindo a principal fonte de abastecimento de água de pequenos aglomerados populacionais.

Após processamento dos dados adquiridos, foram criadas seções obtidas a partir da inversão das sondagens 1D extraídas do modelo de distribuição de valores de resistividades que contribuem para a compreensão da distribuição espacial e tipologia do sistema aquífero existente na área de estudo. No local foram efetuadas 21 sondagens eletromagnéticas verticais com o TDEM na localidade de Chã das Caldeira, Ilha Fogo, Cabo Verde. Para o efeito foi utilizado o equipamento TEM-FAST, com antena de geometria quadrada e dimensão de 200 metros (m) de lado, de modo a alcançar o maior número de estruturas geológicas em profundidade e a cobrir uma vasta área a partir da superfície do terreno. A partir do modelo tridimensional resultante da interpretação das 21 sondagens TDEM é possível verificar a existência de uma relação directa entre as anomalias geofísicas detectadas com as estruturas geológicas observáveis à superfície, assim como a existência de anomalias, subhorizontais, com baixo valor de resistividade (<400ohm/m) que estarão associadas à presença de um aquífero superficial. Este estudo revelou-se um contributo importante para a identificação, interpretação e delimitação da geometria das reservas de água existentes, permitindo desta forma planear com maior rigor e racionalidade as campanhas de captação.

Palavras-Chave: Cabo Verde, água subterrânea; TDEM, resistividade; modelos 2D e 3D.

**ABSTRACT:** The use of the Time Domain Electromagnetic Method [TDEM], contributes significantly to the location of geological structures in-depth and definition of their geometry. The geological/structural models obtained by processing geophysical prospecting data, complemented with the integration of other information and methodologies, allow identifying and locating geological structures with capability for groundwater exploration. The elaboration of models, obtained through the TDEM method, allows to have a perspective of geological structures, as well as to identify and interpret the spatial relationship between them, contributing to a better knowledge of the subsurface of the Ilha do Fogo volcano crater. In Cape Verde, an archipelago with generally low rainfall, whose average values do not exceed 300mm/year for areas located below 400 meters and 700mm/year for areas located more than 500 meters above sea level (INGRH, 2000, Lima and Garcia, 2011), underground water resources play a fundamental role, constituting the main source of water supply for small settlements.

After processing the acquired data, sections obtained from the inversion of 1D surveys were created, extracted from the resistivity values distribution model that contribute to the understanding of spatial distribution and type of the aquifer system present in the study area. At the site, 21 vertical electromagnetic surveys were carried out with the TDEM, in the town of Chã das Caldeira, Ilha Fogo, Cape Verde. For this purpose, it was used a TEM-FAST equipment with a square geometry antenna and with a dimension of 200 meters (m) sideways, to reach the largest number of geological structures in-depth and to cover a vast area from the surface of the terrain. From the three-dimensional model resulting from the interpretation of the 21 TDEM surveys, it is possible to verify the existence of a direct relationship between the geophysical anomalies detected with the geological structures observed on surface, as well as the existence of subhorizontal anomalies with a low resistivity value (<400ohm/m), which were associated with the presence of a superficial aquifer. This study proved to be an important contribution to the identification, interpretation and delimitation of the geometry of existing water reserves, allowing to plan with greater rigour and rationality the water abstraction campaigns.

Keywords: Cape Verde, groundwater; TDEM, resistivity; 2D and 3D models.

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 42, N.º 2, 23-29 dezembro de 2021.

© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh42n2-cti2

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho pretende ser mais um contributo para conhecimento e avaliação do potencial das águas subterrâneas no arquipélago de Cabo Verde, complementando os vários estudos até à data efectuados com semelhante objectivo (Santos *et al.*, 2006, Gomes, 2007, Pina, 2009, Garcia, 2010). O uso dos métodos electromagnéticos neste tipo de prospecção, é cada vez mais corrente devido à facilidade de operação com os equipamentos de medida e à rápida recolha dos dados de campo. Estas vantagens são importantes do ponto de vista económico, tendo estes métodos uma grande aplicação em zonas com camadas superficiais muito resistivas, ou seja, onde os métodos eléctricos de resistividade são de difícil aplicação devido às resistências de contacto eléctrodo/solo elevadas. A utilização do TDEM, permite uma abordagem rápida e eficiente para localização das estruturas geológicas e avaliação hidrogeológica em profundidade. A construção de modelos geofísico-estruturais 3D, facilita a sua visualização, bem como o estudo das suas relações espaciais, contribuindo para um melhor conhecimento da subsuperfície da cratera do vulcão da Ilha do Fogo.

O método apresenta várias vantagens que fazem com que seja muito utilizado em estudos de prospecção geofísica aplicados a diversas áreas de estudo de uma forma geral, mas direccionada para o estudo da prospecção mineira de depósitos minerais profundos, fornecendo bons resultados na determinação da sua geometria e desenvolvimento vertical e horizontal (Duarte *et al.*, 2014). Esta técnica, permite a detecção e localização de formações que exibam valores de resistividade contrastantes com os do restante meio geológico (AEMR, 2007), condições essas que se verificam existir no local estudado. A facilidade de transporte e versatilidade do equipamento, baixo custo operacional e fiabilidade dos dados, permite um vasto campo de aplicação e tornam os trabalhos de campo relativamente expeditos neste tipo de ambientes vulcânicos (Duarte *et al.*, 2017, 2017). Este método tem elevada resolução vertical.

A aplicação do método em zonas vulcânicas aparece vulgarmente associado a estudos hidrogeológicos como meio de identificar a circulação de fluidos hidrotermais e sistemas aquíferos, sendo de realçar os estudos desenvolvidos no vulcão Kilauea no Hawaii, Monte Somma-Vesuvio em Itália, vulcão Piton de la Fournaise na ilha de Réunião, vulcão Newberry, Oregon, USA e caldeira Masaya na Nicarágua (Kauahikaua, 1993; Fitterman *et al.*, 1988; Lénat *et al.*, 2000; Manzella *et al.*, 2004; MacNeil *et al.*, 2007, Duarte *et al.*, 2017).

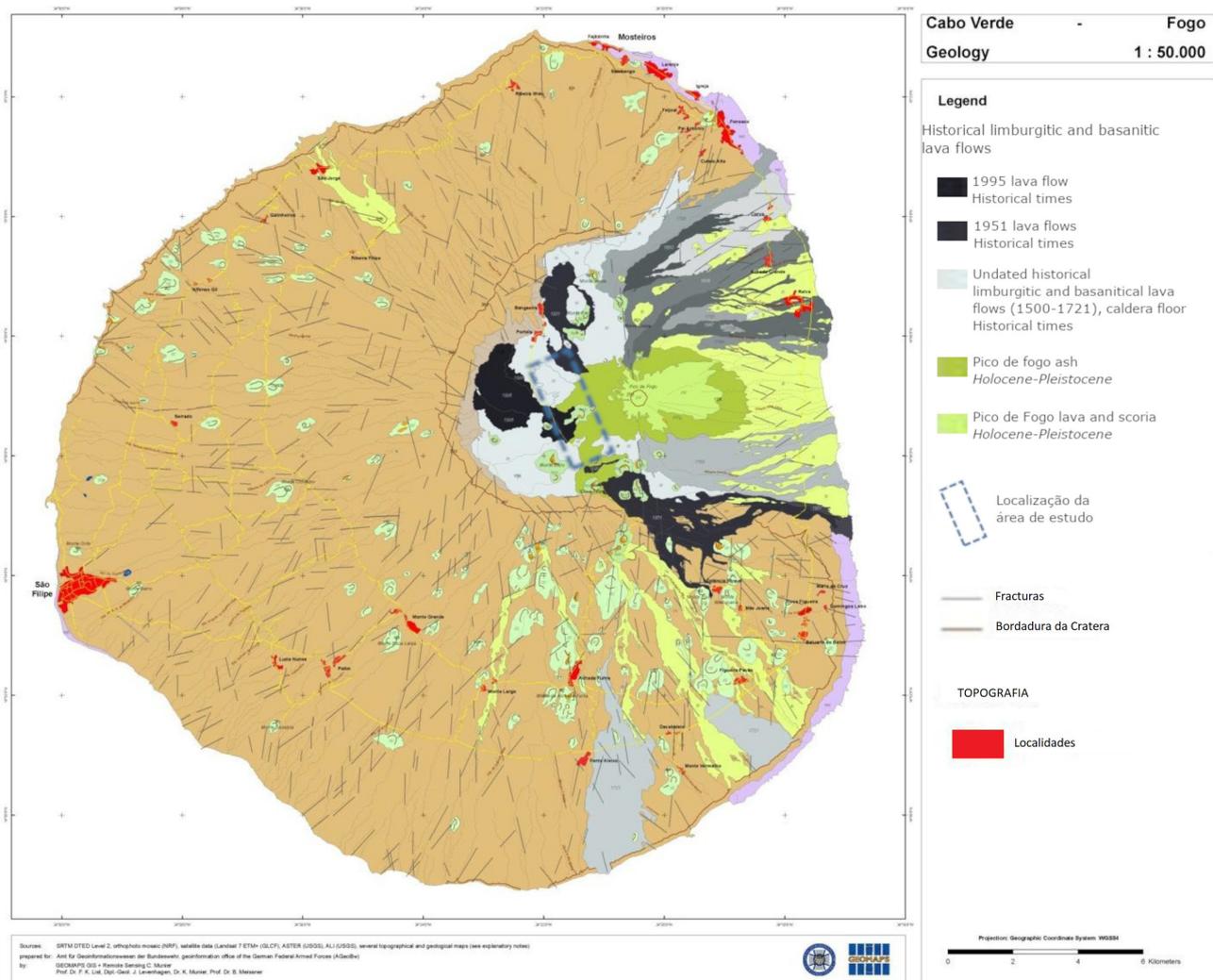
## 2. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

A ilha do Fogo pertence ao grupo de ilhas do sotavento do arquipélago de Cabo Verde, que está localizado no oceano Atlântico, a cerca de 500 km da costa Africana e possui uma área de 477 km<sup>2</sup> (Figura 1), com uma altitude máxima de 2829 metros no cone central (Pico) e uma cratera com 9km de diâmetro, sendo de realçar que a cratera apresenta uma fenda na sua bordadura oriental. Esta ilha apresenta características de natureza vulcano-estratigráfica, apresentada na cronologia dos acontecimentos geológicos (Figura 2). As rochas basálticas do Fogo, que ocupam a maior parte da ilha sob o modo de escoadas, filões e chaminés, correspondem à fase efusiva, enquanto que os inúmeros cones vulcânicos de material piroclástico, também basálticos, correspondem à fase explosiva das erupções (Machado & de Assunção, 1965). Estratigraficamente a ilha é caracterizada pela sequência de escoadas vulcânicas intercaladas por camadas piroclásticas, sobre um soco com rochas mais antigas:

1. Rochas do Complexo Antigo (CA): Rochas alcalinas e carbonatitos, atravessada por filões basálticos. Camada tida como impermeável (BURGEAP, 1974 e BARMEN *et al.*, 1990);
2. Complexo Eruptivo Principal (CEP): Intercalações de escoadas lávicas e camadas piroclásticas;
3. Parte superior da ilha: Escoadas basálticas recentes.



**Figura 1.** Localização da ilha do Fogo no arquipélago de Cabo Verde, assinalada com um polígono. (adaptado de <http://www.portugalcaboverde.com>).

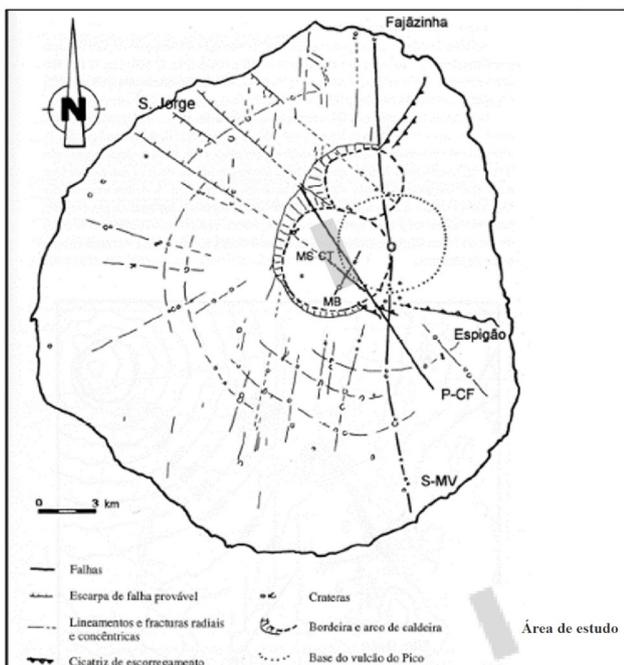


**Figura 2.** Carta geológica da ilha do Fogo, Cabo Verde, na escala de 1:50 000 e localização da área estudada, estando assinaladas na legenda da figura, com setas, as formações geológicas e escoadas vulcânicas abrangidas pela área estudada (adaptado de List *et al.*, 2007).

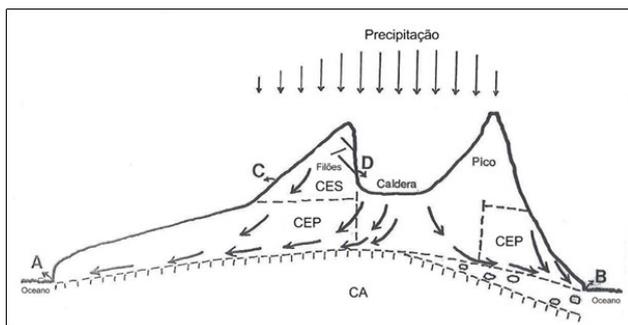
Estruturalmente é visível um grande número de estruturas tectónicas, sendo de realçar os três sistemas de falhas principais com orientações: NW-SE a WNW-ESE, N-S e NNE-SSW (Figura 3).

Cabo Verde é um arquipélago com precipitações na generalidade fracas, cujos valores médios não ultrapassam 300mm/ano para as zonas situadas abaixo de 400 metros de altitude e 700mm/ano para as zonas situadas a mais de 500 metros de altitude (INGRH, 2000, Lima e Garcia, 2011). O sistema hidrogeológico da Ilha foi descrito pela primeira vez nos trabalhos do BURGEAP (1974) onde é estabelecido um modelo de circulação que considera as pequenas nascentes, situadas a maior altitude, com a denominação local de “chupadeiros”, como se tratando de aquíferos locais, enquanto que as grandes nascentes, situadas na

costa, seriam resultado de aquíferos regionais com a zona de recarga localizada na caldeira do vulcão. A camada aquífera seria, segundo estes autores, a parte inferior, bastante fracturada, do CEP. A base do aquífero seria representada pelo topo do CA, considerado impermeável. Trabalhos posteriores (Barmem *et al.*, 1990) consideraram também o topo do CA como sendo impermeável e funcionando como base do aquífero regional, que teria início na caldeira do vulcão. Consideram também os “chupadeiros” como aquíferos locais devidos, no caso, à existência de grande número de filões na parte superior do CEP chamado, pelos autores, de Complexo Eruptivo da Bordeira (CEB). O modelo hidrogeológico está esquematizado na Figura 4 (Gesto, 2011).



**Figura 3.** Esboço estrutural da Ilha do Fogo e localização da área estudada (adaptado de Brum da Silveira et al., 1997).



**Figura 4.** Modelo hidrogeológico da ilha do Fogo. CA – Complexo antigo, CEP – Complexo eruptivo principal, CES – Complexo eruptivo superior. A, B – nascentes junto à costa (Nossa Senhora do Socorro e Monte Vermelho, respectivamente. C – “Chupadeiros”, D – Nascente da Chã (Gesto, 2011).

### 3. MÉTODO E METODOLOGIA

A resistividade elétrica de uma formação geológica resulta diretamente da sua porosidade, do teor de água, à salinidade, à temperatura e ao aumento da presença de minerais de argila. Estes factores, conjuntamente com a anisotropia vertical e lateral dos materiais pétreos, são factores que tornam possível a monitorização de vulcões e sistemas hidrotermais através de métodos de prospecção geofísica que usem as propriedades físicas da resistividade eléctrica (Revil *et al.*, 2002). Os edifícios vulcânicos tendem a ter uma estrutura permeável que é facilmente infiltrada por água meteórica. Estes sistemas hidrotermais desenvolvem-se onde a água meteórica descendente encontra fluidos quentes e magmáticos, podendo estes, ser utilizados para produção de energia eléctrica a partir da geotermia.

Os conceitos teóricos, técnicas de interpretação e campos de aplicação do método TDEM estão descritos no trabalho de McNeill (1994).

A utilização deste método [TDEM] teve como objetivo a aplicação de uma metodologia de prospecção (dimensão das antenas, espaçamento entre sondagens e parâmetros físicos do equipamento) em ambientes vulcânicos, de modo a contribuir para a sua interpretação geofísica, geológica, estrutural e hidrogeológica.



**Figura 5.** Fotografia panorâmica do local da execução de uma das sondagens TDEM.

Para o efeito foram efetuadas 21 sondagens, georreferenciadas no seu ponto central, na proximidade da localidade de Chã das Caldeira, na Ilha Fogo, Cabo Verde, utilizado o equipamento TEM-FAST, com uma antena de geometria quadrada e dimensão com 200 metros de lado (Figura 5), que permita uma maior profundidade de investigação e alcançar estruturas geológicas em profundidade. A antena utilizada era de uma única espira, funcionando como transmissora e receptora do sinal. A distribuição dos 21 pontos de amostragem, foi seleccionada tendo em conta abranger uma vasta área que intercetasse o maior número de estruturas existentes, identificáveis à superfície (cones piroclásticos, escoadas e falhas) (Figura 6).



**Figura 6.** a) Localização da área de estudo, polígono a vermelho. b) Localização das sondagens eletromagnéticas e das erupções (Adaptado do Google Earth, 2017).

#	Name	X(m)	Y(m)	Z(m)	Res 1 (Ohm-m)	Res 2 (Ohm-m)	Res 3 (Ohm-m)	Res 4 (Ohm-m)	Thick 1 (m)	Thick 2 (m)
1	CABOVERDE	785293.0	1652024.0	1848.0	1279.34	1997.47	0.43	0.10	5.34	436.02
2	CABOVERDE	785290.0	1652168.0	1879.0	1260.00	1993.00	0.32	0.10	5.21	432.40
3	CABOVERDE	785249.0	1652278.0	1884.0	1536.00	1805.00	0.16	0.16	4.70	10.00
4	CABOVERDE	785198.0	1652374.0	1807.0	1111.00	1639.00	0.21	0.21	6.55	10.00
5	CABOVERDE	785106.0	1652270.0	1847.0	930.30	1648.00	0.47	0.47	7.50	10.00
6	CABOVERDE	784918.0	1652125.0	1801.0	47.51	1342.55	0.11	0.11	1.53	10.00
7	CABOVERDE	785085.0	1652555.0	1788.0	1899.00	0.93	0.14	0.14	442.50	10.00
8	CABOVERDE	784941.0	1652664.0	1809.0	1793.00	0.58	0.10	0.10	384.70	10.00
9	CABOVERDE	784843.0	1652757.0	1861.0	2000.00	3.48	15.90	15.90	608.70	10.00
10	CABOVERDE	784730.0	1652859.0	1856.0	1259.00	310.90	0.81	0.81	395.80	10.00
11	CABOVERDE	784685.0	1653024.0	1825.0	1991.00	0.39	0.10	0.10	312.00	10.00
12	CABOVERDE	784619.0	1653166.0	1811.0	2000.00	0.46	0.10	0.10	311.45	10.00
13	CABOVERDE	784737.0	1652541.0	1845.0	1329.00	88.30	0.10	0.10	350.20	10.00
14	CABOVERDE	784716.0	1652080.0	1781.0	1906.00	3.25	0.76	0.76	591.50	10.00
15	CABOVERDE	784102.0	1652052.0	1789.0	2000.00	0.56	0.10	0.10	381.50	10.00
16	CABOVERDE	783977.0	1652011.0	1821.0	2000.00	0.73	0.10	0.10	369.30	10.00
17	CABOVERDE	784010.0	1654144.0	1900.0	2000.00	0.49	0.10	0.10	408.70	10.00
18	CABOVERDE	783870.0	1654144.0	1740.0	2000.00	0.62	0.10	0.10	429.13	10.00
19	CABOVERDE	783941.0	1654146.0	1782.0	2000.00	1.56	0.10	0.10	371.10	10.00
20	CABOVERDE	783986.0	1654674.0	1843.0	1973.00	1.39	0.10	0.10	385.90	10.00
21	CABOVERDE	783882.0	1654835.0	1781.0	1794.97	1965.26	0.76	0.12	1.08	402.49

Figura 7. Valores das espessuras, profundidades e resistividades, em ficheiro .txt após inversão no TEM-RES-WIN.

O equipamento foi configurado para a aquisição ser efectuada com os seguintes parâmetros: Stack: 10; Time: 5; Frequência: 60Hz; Intensidade da corrente: 4A (com utilização de duas baterias de 12V, com tensão de alimentação de 24V), parâmetros esse que foram após a realização de alguns ensaios experimentais, considerados os mais adequados para obter dados com menor ruído possível e maior profundidade de investigação. Os dados recolhidos foram processados no programa TEM-RES-WIN (AEMR, 2009), tendo-se procedido à sua inversão para obtenção do modelo. Na primeira fase de processamento dos dados, foi efectuada com a utilização de algoritmos convencionais (inversão Occam e Marquardt, inversão quasi-2-D com limitação lateral) a inversão 1D dos valores registados das várias sondagens realizadas (Figura 7), sendo estes inicialmente verificados no próprio programa, de onde foram extraídos perfis 2D (Figura 8). Posteriormente foi efectuada uma interpolação em formato voxel data para a obtenção de um modelo geofísico tridimensional com representação das estruturas interpretadas, tendo-se procedido sequencialmente à integração do modelo geofísico na topografia para construção e coadjuvação na interpretação (Figura 8).

#### 4. RESULTADOS

O modelo geofísico 3D obtido partir dos dados processados, evidencia a existência de valores de distribuição de resistividade bastante distintos, com amplitude que variam entre 655 e 1980 ohm/m. Os valores das anomalias superiores (>1185 ohm/m) pelo seu posicionamento, devem corresponder a escoadas de lava, que preenchem estruturas existentes e identificadas em Duarte *et al*, 2017 (Figura 9). Do modelo tridimensional, é perceptível o controlo estrutural das anomalias geofísicas subsuperficiais com uma relação directa com morfoestruturas existentes à superfície (falhas

e descontinuidades), estruturas essas representadas na cartografia geológica já existente (Figura 10).

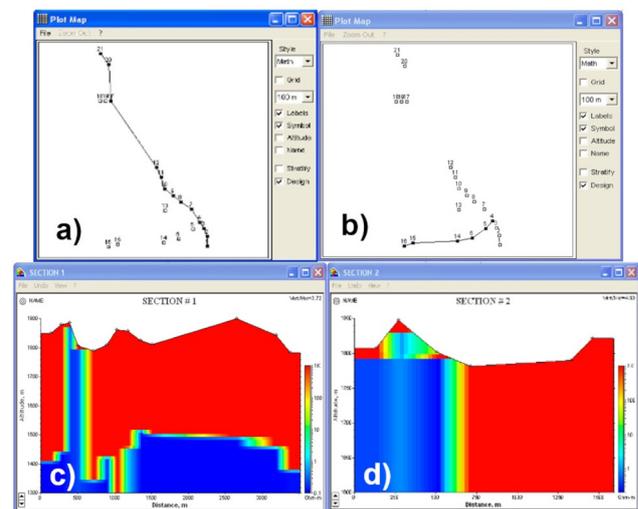


Figura 8. (a) Mapa de localização do perfil 1. (b) – Mapa de localização do perfil 2. (c) – Perfil 2D extraído de a. (d) – Perfil 2D extraído de b).

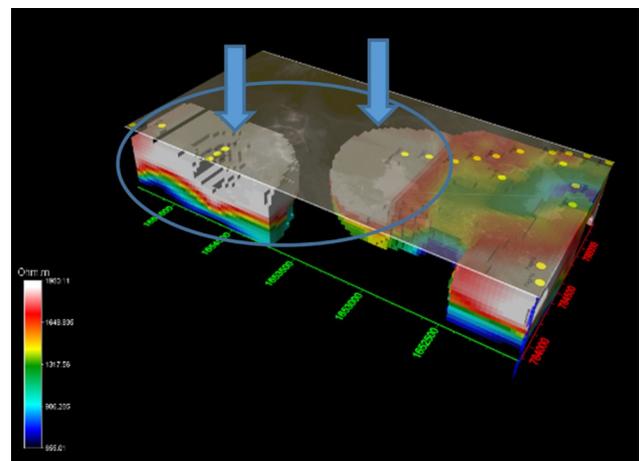
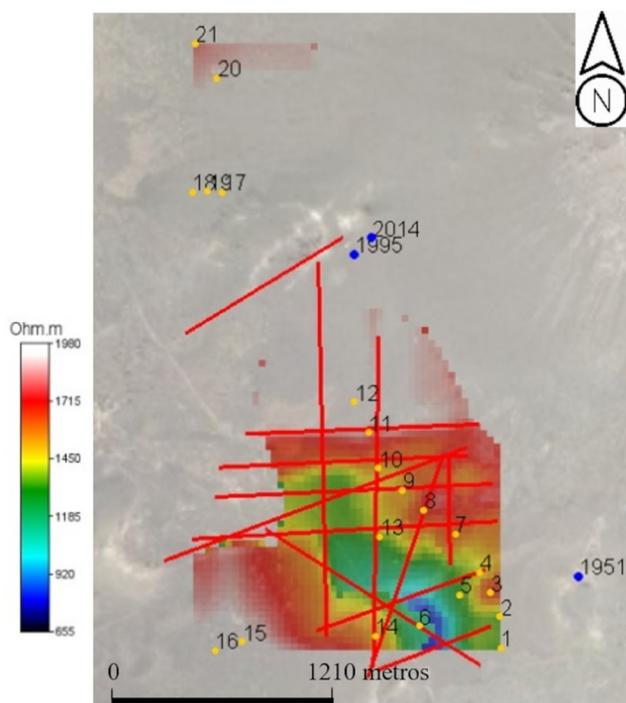
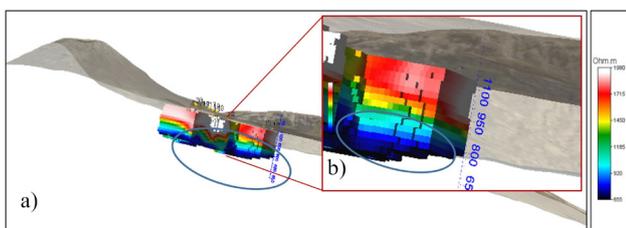


Figura 9. Modelo de resistividades 3D construído a partir da inversão dos dados de campo, com a localização das sondagens, (círculos amarelos) e escoadas de lava (elipse e setas azuis).

No modelo é ainda identificada uma anomalia com valores de resistividade inferiores ( $<1185\text{ohm/m}$ ), que poderá corresponder aos limites de um possível aquífero superficial (indicado pela elipse azul), que se encontra a cerca de 200 m de profundidade, a uma altitude aproximada de 950 metros (Figura 11 b)). Na figura 11 a) observam-se anomalias com valores de resistividade mais baixa ( $<1185\text{ohm/m}$ ) que poderão estar associadas à circulação de água através de uma estrutura subhorizontal. Este possível aquífero foi também evidenciado nos resultados obtidos pelo processamento dos dados de TDEM e de MT referidos no relatório da Gesto, 2011.



**Figura 10.** Modelo de resistividades 3D construído a partir da inversão dos dados de campo, com a localização das sondagens, (círculos amarelos), cones piroclásticos com a data das erupções (círculos azuis) e descontinuidades inferidas (linhas vermelhas).



**Figura 11.** a) Modelo geofísico 3D, criado a partir dos valores de distribuições de resistividade por inversão dos dados das sondagens 1D. Elipse azul – Limites do possível aquífero. b) Pormenor dos limites e escala de altitudes.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

OTDEM revela-se como um método expedito, tanto no processo de aquisição como no processamento dos dados, podendo alcançar elevadas profundidades de investigação. É um método de prospecção pouco dispendioso, obtendo-se uma boa quantidade de informação a baixo custo e com boa resolução na obtenção de modelos que devem ser sempre correlacionados com dados de natureza topográfica e geológica/estrutural.

Em trabalhos futuros deveriam ser efectuadas mais campanhas de sondagens electromagnéticas, de modo a fazer uma melhor caracterização geofísica/geológica da unidade geológica onde está implantado o aquífero. Paralelamente, com o intuito de aumentar o conhecimento geológico e hidrogeológico da área devia proceder-se à execução de sondagens mecânicas com recuperação de testemunho, para calibração dos dados de campo recolhidos pela geofísica, fazer a sua correlação com a geologia da região, bem como proceder à execução de um furo para ensaios de bombagem, em locais a seleccionar de acordo com a geologia e os resultados obtidos nos trabalhos de prospecção geofísica. Com os resultados obtidos é possível caracterizar e dimensionar locais onde é possível construir novas captações de água, quer seja ela através de furos ou de pequenas galerias horizontais/subhorizontais construídas em flanco de encosta.

## AGRADECIMENTOS

À IQGeo que disponibilizou equipamentos e suporte financeiro.

Ao Centro de Geociências da Universidade de Coimbra e ao Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra que disponibilizou o equipamento TEM-FAST.

À Universidade de Cabo Verde pelo apoio financeiro e logístico disponibilizados para a realização de missão. Agradecemos igualmente ao técnico Paulo Fernandes da UniCV pela colaboração prestada.

Agradecemos o apoio financeiro da FCT-MEC através de fundos nacionais e, quando aplicável, co-financiado pelo FEDER no âmbito da parceria PT2020, através do projecto de investigação UID/Multi/00073/2013 do Centro de Geociências.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEMR (2007). Manual TEM-FAST48HPC. Version 7.3. Applied Electromagnetic Research (AEMR), The Netherlands.

- AEMR (2009). Manual TEM-RESEARCH. Version 7. Applied Electromagnetic Research (AEMR), The Netherlands.
- Barmem, G., Carvalho, V., Querido, A. (1990) – Groundwater-Related Geological and Isotopic Investigations on the Island of Fogo. Dept. of Engineering Geology Lund University Institute of Technology and Instituto Nacional de Investigação Tecnológica, Departamento de Geologia. Praia and Lund, 5 July, 1999.
- Brum da Silveira, A., Madeira, J., Serralheiro, A., Torres, P. C., Silva, L. C., & Mendes, M. H. (1997). O controlo estrutural da erupção de Abril de 1995 na ilha do Fogo. In 1st International Symposium “A erupção vulcânica de 1995 na ilha do Fogo, Cabo Verde, pp. 51-6).
- BURGEAP (1974) – La mise en valeur des eaux souterraines dans l’arquipel du Cap Vert. Brigada de Águas Subterrâneas de Cabo Verde. Final Report.
- Duarte, J. A. M., Figueiredo, F. P. O., & Mira, M. J. M. F. (2014). Caracterização geológico-estrutural de uma pedreira de dolerito com aplicação de prospeção geofísica e análise estrutural.
- Duarte, João; Cunha, Marco; Figueiredo, Fernando; Gonçalves, Gil; Lobo de Pina, António; Victória, Sónia (2017). CARACTERIZAÇÃO E MODELAÇÃO GEOFÍSICA NA CRATERA DO VULCÃO DO FOGO, CABO VERDE. In: 10º SIMPOSIO DE METEOROLOGIA E GEOFÍSICA DA APMG, 2017. Lisboa. 10º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG. 2017.
- Duarte, João; Cunha, Marco; Figueiredo, Fernando; Lobo de Pina, António; Victória, Sónia. (2017). CONTRIBUTO DO MÉTODO ELECTROMAGNÉTICO DE TRANSIENTE (TEM) NA PROSPECÇÃO HIDROGEOLOGICA CASO DE ESTUDO NA ILHA DA BRAVA, CABO VERDE In: 11º Seminário sobre águas subterrâneas. Instituto Superior de Engenharia do Porto. APRH - Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. ISBN: 978-989-8509-17-8. p. 12-13.
- Fitterman, D.V., Stanley, W. D., and Bisdorf, R. J. (1988). Electrical structure of Newberry volcano, Oregon, J. Geophys. Res., 93(B9), 10,119-10,134.
- Garcia, E. M. O. (2010) Gestão integrada dos recursos hídricos da ilha do Maio (Cabo Verde): o contributo das águas subterrâneas. Tese de mestrado, Universidade do Minho.
- Gesto (2011). PLANO ENERGÉTICO RENOVÁVEL DE CABO VERDE. Estudo do Recurso Geotérmico. p.14-15.
- Gomes, A. M. (2007) Hidrogeologia e recursos hídricos da Ilha de Santiago (Cabo Verde). Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- INGRH (2000) Visão Nacional sobre a Água, a Vida e o Ambiente no Horizonte. Instituto Nacional de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, Praia, Cabo Verde.
- Kauahikaua, J. (1993). Geophysical characteristics of the hydrothermal systems of Kilauea volcano, Hawaii, Geothermics, 22(4), p. 271-299.
- Lénat, J. F., Fitterman, D., Jackson, D. B., and Labazuy, P. (2000). Geoelectrical structure of the central zone of Piton de la Fournaise volcano (Réunion), Bulletin of Volcanology, 62, 75-89.
- Lima, A. S. & Garcia, E.M.O. (2011) Gestão de águas subterrâneas em ambientes insulares. Caso de estudo da ilha do Maio (Cabo Verde).
- List, F. K., Klitzsch, E., Kusserow, H., Munier, K., Munier, C. & Levenhagen J. (2007) Cape Verde Islands: Santo Antão, São Vicente, Sal and Fogo, Thematic Maps, Geology. Geoinformations wesen der Bundeswehr (AGeoBW)/Geoinformation Office of the German Armed Forces.
- Machado, F., & de Assunção, C. F. T. (1965). Carta geológica de Cabo Verde, na escala de 1:100000 e notícia explicativa da folha da ilha do Fogo: estudos petrográficos. In: Garcia de Orta: Revista da Junta de Investigações do Ultramar. - Vol. 13, nº 4, p. 597-604.
- Manzella, A., Volpi, G., Zaja, A., and Meju, M. (2004). Combined TEM-MT investigations of shallow-depth resistivity structure of Mt Somma-Vesuvius, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 131, p. 19-32.
- McNeill, J.D. (1994). Principles and Application of Time Domain Electromagnetic Techniques for Resistivity Sounding. Technical Note TN-27, Geonics Ltd., Ontario, Canadá.
- MacNeil, R. A, Sanford, W. E, Connor, C. B., Sandberg, S. K. e Diez, M. (2007). Investigation of the groundwater system at Masaya Caldera, Nicaragua, using transient electromagnetics and numerical simulation. Journal of Volcanology and Geothermal Research 166 (2007), p 217 –232.
- Pina, A. F. L. (2009) Hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago - Cabo Verde. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.
- Santos, F.A.M., Almeida, E.P., Gomes, A. M., & Pina, A. (2006) Hydrogeological investigation in Santiago Island (Cabo Verde) using magnetotellurics and VLF methods. Journal of African Earth Sciences, Volume 45, Issues 4–5, p. 421–430.

## REFERÊNCIAS INTERNET

<http://www.portugalcaboverde.com>, consultada em Janeiro de 2019.

Google Earth Pro, consultada em Março de 2017.