

INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS DE GEORRADAR E INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA PARA O MAPEAMENTO DE GRUTAS: APLICAÇÃO À LAPA DO SONO - ARRÁBIDA

INTEGRATION OF GEORRADAR METHODS AND ELECTROMAGNETIC INDUCTION FOR CAVES MAPPING: APPLICATION TO SONO CAVE - ARRÁBIDA

B. Caldeira

Instituto de Ciências da Terra e Departamento de Física, ECT- Universidade de Évora

R. J. Oliveira

Instituto de Ciências da Terra - Universidade de Évora

L. Rocha,

Centro de História da Arte e Investigação Artística, Universidade de Évora

J. F. Borges

Instituto de Ciências da Terra e Departamento de Física, ECT- Universidade de Évora

S. Neves,

Instituto de Ciências da Terra - Universidade de Évora

R. Fernandes

Centro de História da Arte e Investigação Artística, Universidade de Évora

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os resultados da aplicação da geofísica ao mapeamento de uma secção da Lapa do Sono - Serra da Arrábida (Sesimbra), que se sabe ter tido ocupação funerária na época do Neolítico antigo e atualmente se apresenta extremamente obstruída por sedimentos. Foram escolhidas duas técnicas frequentemente utilizadas na prospecção da subsuperfície em ambiente arqueológico, o Georradar (GPR) e a Indução Eletromagnética de baixa frequência (EM). O difícil estado do terreno e os condicionalismos colocados em defesa da proteção da natureza impuseram um programa de aquisição de dados segundo um paradigma um pouco diferente do habitual. A metodologia seguida para a obtenção de resultados teve que se basear numa análise exaustiva sobre um limitado número de perfis modelados, utilizando distintas sistemáticas de processamento 2D, implementadas para despistar os principais fatores de erro. Os resultados permitem delinear a gruta principal inserida num meio cárstico, extensamente fragmentado, principalmente nas áreas de cobertura da cavidade. Também se recolheram indícios de outras cavidades menores contíguas à gruta principal que podem estar a ela ligadas através de galerias menores preenchidas por sedimentos. A partir da interpretação dos resultados foi feita a avaliação da espessura de sedimentos acumuladas na periferia da gruta, sob os perfis amostrados.

Palavras-chave: Georradar, Indução Eletromagnética, Prospecção Geofísica em ambiente cárstico, Modelação Geofísica.

ABSTRACT

This paper presents the results of the geophysical survey to mapping a section of the "Lapa do sono" cave, situated in Serra da Arrábida (Sesimbra), which is known to have had funerary occupation in the old Neolithic Age. Nowadays this cave finds itself widely obstructed by sediments, whose extension we intent know. Two technics frequently used in the subsurface prospection in an archaeological environment were chosen, the Ground Penetrating Radar (GPR) and the low-frequency electromagnetic induction (EM). Due to the difficult terrain circulation state, which cannot be improved due the restrictions imposed by the nature protection defence, the data acquisition was made according an unusual paradigm. The methodology followed had based on an exhaustive analysis about a limited number of modelling profiles, using a distinct 2D processing methods. The results allow to outline the sector A of the cave inserted in a karst environment, widely fragmented, mainly on the cavity coverage areas. Evidences of other minor cavities adjacent to the main cave have also been collected; these cavities may be connected to the grotto through minor galleries filled with sediments. The interpretation of the results allowed the evaluation of the sediments thickness accumulated on the grotto surrounding's, under the sampled profiles.

Keywords: Ground Penetrating Radar, Electromagnetic Induction; Geophysical Prospection in karst environment, Geophysics Modelling.

INTRODUÇÃO

A Lapa do Sono, complexo cárstico encontrado em 2005 na Serra da Arrábida no decurso de uma campanha espeleológica, é constituído por duas cavidades principais (setor A e setor B,) ligadas por um corredor com passagem estreita (Fig. 1). A entrada faz-se por uma abertura na superfície que dá acesso ao setor A, cavidade com cerca de 1 m de altura por 6 m de comprimento e 4 m de largura. A descoberta de fragmentos de cerâmica e ossos humanos nesse setor, determinou a realização de trabalhos arqueológicos que revelaram tratar-se de um espaço com ocupação funerária do neolítico antigo (Fernandes et al., 2015).

No decurso dos trabalhos arqueológicos verificou-se que o espaço se encontra bastante obstruído por sedimentos, surgindo dúvidas sobre as reais dimensões da cavidade, particularmente na zona oriental onde a espessura dos sedimentos atinge o teto da gruta. Procurar saber a volumetria do setor A e estimar a extensão dos sedimentos arqueológicos usando técnicas geofísicas não destrutivas foi o desafio que nos foi colocado. De entre o conjunto de técnicas geofísicas não invasivas apresentadas na literatura para a prospeção da subsuperfície em vários ambientes (Reynolds, 1997; Lazzari et al, 2010), a combinação de Georradar (GPR) e Indução Eletromagnética (EM) surge como a escolha adequada quando está em causa a análise detalhada de estruturas em meios complexos, como é o caso das grutas em meios cársticos (Doolittle et al., 1998; El-Qady et al., 2005; Beres et al., 2001). Devido às más condições da superfície e à impossibilidade de as melhorar por constrangimentos de natureza ambiental, foi apenas possível efetuar medições de GPR e de EM sobre uma faixa muito limitada da superfície que cobre a gruta (Fig. 2). É a partir da interpretação desses dados que procuraremos compreender um pouco melhor aquele espaço.

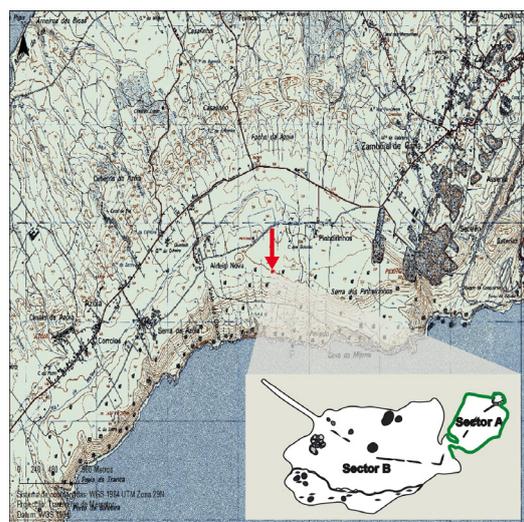


Figura 1- Área de estudo (seta vermelha), Lapa do Sono, localizada na Serra da Arrábida (Sesimbra).

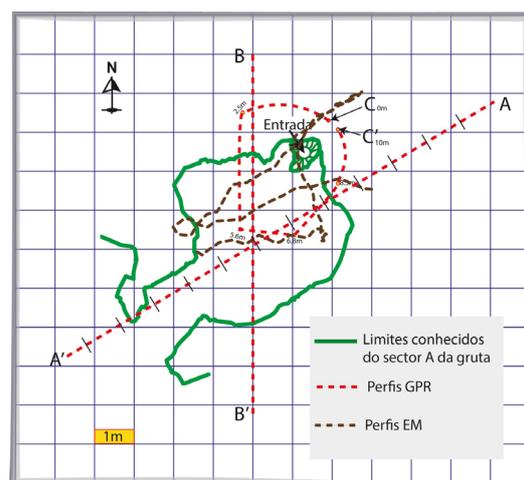


Figura 2- Limites do setor A da Lapa do Sono, com a localização dos perfis de prospeção geofísica realizados.

TÉCNICAS GEOFÍSICAS

A Geofísica é a ciência que estuda a Terra por aplicação dos princípios e leis da Física. Na sua forma aplicada usa um conjunto de técnicas de investigação do subsolo a partir dos valores de várias grandezas físicas medidas à superfície. O resultado são modelos da distribuição espacial das propriedades físicas do subsolo, relacionáveis com as estruturas que compõem esse

subsolo. Tais modelos são obtidos por processamento dos dados registados à superfície, através da aplicação de leis físico-matemáticas desenvolvidas para o efeito. A característica comum a todos os métodos de exploração Geofísica é serem não destrutivos; em nenhum caso produzem uma alteração permanente do terreno onde se aplicam. O âmbito da aplicação da geofísica é vasto, abrangendo desde o estudo das regiões mais profundas da Terra até à detecção de estruturas muito próximas da superfície. Os modelos gerados geralmente são traduzidos por imagens de visão peculiar, distintas das que captamos diretamente com os órgãos da visão, contudo possíveis de traduzir para uma linguagem inteligível embora por vezes com uma resolução baixa. Pese essas limitações os modelos geofísicos constituem uma importante ferramenta de trabalho em todas as situações em que seja necessário obter informação subsuperficial.

GEORRADAR

O georradar é um método electromagnético de grande aplicabilidade e atualmente um dos preferidos na prospecção próxima da superfície, devido à rapidez de aquisição de dados e à qualidade dos modelos produzidos. O funcionamento do georradar (Milson, 2003) consiste na transmissão de pulsos electromagnéticos com determinada frequência através de uma antena (Tx) dirigida para o subsolo e na recepção, noutra antena (Rx), da parte da energia desses pulsos refletida nas estruturas enterradas no solo. Assim, cada pacote de registo de GPR (traço) corresponde à onda que procede do solo durante um determinado intervalo de tempo escolhido. A amplitude dessa onda em cada instante relaciona-se com as propriedades elétricas e magnéticas do meio atravessado e em cada profundidade. Um pico de amplitude significa que a porção de onda que corresponde a esse pico provém de uma interface entre dois meios com propriedades diferentes; o instante (em ns) onde esse pico se

encontra no traço corresponde ao tempo (duplo) de propagação da onda entre a interface refletora e a antena. Assim cada traço registado contém informação simultânea sobre a existência alterações das propriedades electromagnéticas do meio prospectado (resistividade elétrica, constante dielétrica e permeabilidade magnética) e distância dessas alterações à antena. A justaposição destes traços provenientes de uma antena que se arrasta ao longo de determinado perfil constitui um diagrama bidimensional denominado radargrama. O radargrama surge então sob a forma de uma imagem que dá uma visão invulgar da distribuição pelo subsolo das propriedades electromagnéticas das estruturas que constituem o meio por onde as ondas se propagam. A interpretação do radargrama permite estimar a localização das estruturas enterradas e suas dimensões sobre um plano vertical. Por interpolação de radargramas contíguos é possível modelar tridimensionalmente a distribuição especial das estruturas sob da superfície.

INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Esta técnica consiste na geração de um campo magnético variável, por passagem de corrente elétrica numa bobine colocada junto da superfície e na medição e da perturbação a esse campo devida a outro campo magnético, gerado pelas correntes de Foucault induzidas. O padrão da perturbação que se vai registar depende da intensidade das correntes de Foucault e dos atrasos verificados na propagação destes campos, que por sua vez são função da condutividade elétrica do subsolo e da sua suscetibilidade magnética, os parâmetros físicos estimados com esta técnica. Concretamente, neste trabalho, os perfis de GPR foram obtidos com um sistema SIR-3000 (GSSI), com antena de 400 MHz. Não foi possível utilizar odómetro e por isso as leituras foram feitas mediante as duas configurações em que esse acessório pode ser dispensado: i) modo ponto, com leituras espaçadas de 20 cm; ii) modo tempo com uma taxa de aquisição de 60 pulsos por segundo e marcas de referencia espacial impressas de metro

a metro. Os perfis EM foram efetuados com um sistema EM38-MK2 (Geonics), equipado com duas bobines de receção espaçadas de 0,5 m e 1 m da bobine de indução, com GPS de dupla frequência, para registo de posição das medidas. O processamento de dados de GPR foi feito com o programa RADAN 7.0 (GSSI) e os de EM com o programa Surfer 12 (Golden).

RESULTADOS

Os resultados que se podem deduzir desta campanha são baseados na interpretação conjunta dos radargramas processados e dos registos de condutividade elétrica e suscetibilidade magnética efetuados e que cobrem parte da gruta (Fig. 2). A obtenção dos radargramas envolveu o seguinte processamento de sinal: corte da onda superficial; remoção do ruído de fundo; filtro horizontal passa alto; desconvolução preditiva. No caso dos dados de EM uma vez que foram obtidos sobre perfis próximos com com localização precisa fez-se a sua interpolação para uma área delimitada pelo contorno dos dados.

GEORRADAR

As Figuras 3, 4 e 5 representam os radargramas obtidos nos perfis AA', BB' e CC' representados na Fig.2. Sobre eles foram marcados vários elementos interpretativos. As linhas tracejadas assinalam descontinuidades identificadas nos radargramas, as quais ou são produzidas nas interfaces entre camadas ou produzidas em zonas de fracturação. Nota-se em todos eles uma camada superficial de espessura variável (~0.5 m), predominantemente homogénea, que se considera corresponder ao solo. Interpretamos os refletos dispersos que se encontram nessa camada como efeito de pedras que possam existir no solo. Sob a camada de solo surge outra camada cortada por abundantes refletos subverticais que associamos a uma camada calcária extensamente fissurada. Ao longo dos radargramas notam-se algumas regiões muito uniformes. Correspondem a zonas de absorção elevada, prováveis locais de retenção de água. A base dos radargramas é

dominada por uma zona curva fortemente refletora que associamos à interface rocha ar devida à presença da gruta.

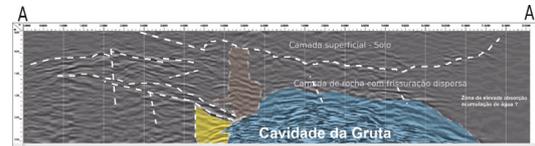


Figura 3- Radargrama interpretado do perfil AA', com 12,6 m de comprimento e orientado NE-SW (Fig. 2). A gruta (mancha azulada) começa um pouco antes da posição dos 5 m, a partir do início do perfil, e estende-se até cerca dos 11 m. Entre os 5 m e os 6 m nota-se uma ona de fraturação extensa (mancha castanha) que poderá corresponder a cavidades menores.

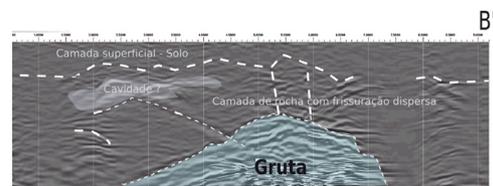


Figura 4- Radargrama interpretado do perfil BB', com 9,2 m de comprimento e orientado N-S (Fig. 2). A gruta (mancha azulada) começa um pouco antes da marca dos 3 m, e estende-se até cerca dos 7,5 m. Entre os 2 m e os 4 m, muito próximo da superfície, existe uma região de alta refletividade (mancha cinza clara), que poderá corresponder a outra cavidade.

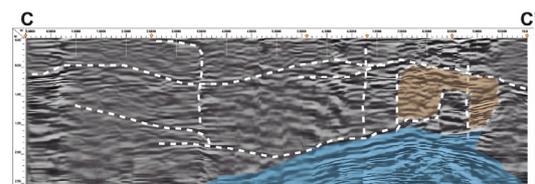


Figura 5- Radargrama interpretado do perfil CC', com 10 m de comprimento, realizado à volta do orifício que serve de entrada da gruta. As marcas circulares sobre o eixo das abcissas estão em correspondência com as marcas dos vértices do perfil assinaladas na Fig. 2.

INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

As Figuras 6 e 7 representam a distribuição espacial da condutividade elétrica e suscetibilidade magnética estimadas a dois níveis de profundidade, 0,75 m e 1,5 m, na área limitada pelos perfis de EM realizados, assinalados na Fig. 2. Para uma

melhor interpretação destes resultados projetou-se os limites do setor A da gruta sobre estas distribuições. Os diagramas foram representados usando a mesma paleta de cores nas quatro distribuições, cujos valores absolutos estão indicados na escala de cores de cada diagrama. Numa apreciação geral verifica-se existirem diferenças significativas nos valores das grandezas nos dois níveis de profundidade que as medições reportam; cada uma das distribuições dá conta da variabilidade lateral verificada. interface rocha ar devida à presença da gruta.

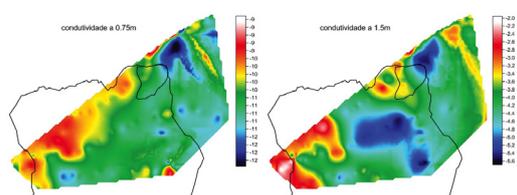


Figura 6- Distribuição espacial da condutividade elétrica, estimada por interpolação dos valores medidos sobre os perfis assinalados na Fig. 2. Esquerda: condutividade para a profundidade 0,75 m. Direita: condutividade para a profundidade 1,5 m.

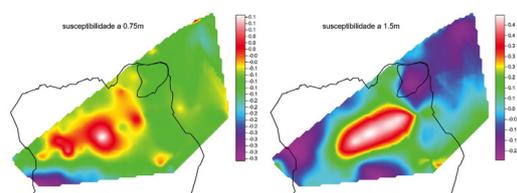


Figura 7- Distribuição espacial da susceptibilidade magnética, estimada por interpolação dos valores medidos sobre os perfis assinalados na Fig. 2. Esquerda: susceptibilidade para a profundidade de 0,75 m. Direita: susceptibilidade para 1,5 m.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A interpretação dos perfis de GPR efetuados sobre o setor A da Lapa do Sono permite perceber o estado de fragmentação do meio cársico onde a cavidade se insere e esboçar a envolvente da cobertura desta cavidade. A diferença entre o padrão de refletividade produzido no radargrama do perfil AA', na posição em que este atinge a gruta ~ 4 m,

assinalado por mancha amarelada na Fig. 3, e o correspondente padrão em posições mais avançadas (mancha azulada) pode indicar a presença de sedimentos sob a cobertura no primeiro troço. Esse fato confere à reflexão um padrão diferente daquele que se produz quando sob a cobertura existe ar. Verifica-se o mesmo comportamento no radargrama do perfil BB', precisamente na região em que este atinge a gruta, faixa entre os ~ 3 m e os ~ 4 m. Conclui-se assim que o setor entre o N e NE em relação à entrada, se encontra preenchida por sedimentos numa extensão que poderá ultrapassar os limites conhecidos em mais de 1 m. Esta conclusão é reforçada pelo perfil CC' que nas secções correspondentes a esta zona (entre 0 m e 2,5 m e entre 8,5 m e 10 m) revelam padrões de refletividade compatíveis com a cobertura da gruta, mas distintos dos que se verificam quando a interface é rocha-ar.

Relativamente aos dados de EM (Fig. 6 e 7) confirma-se que as regiões de cavidade identificadas no GPR apresentam condutividade elétrica mais baixa do que aquelas onde não existe cavidade. As regiões onde a condutividade é mais elevada coincidem com as zonas dos radargramas onde se deteta maior absorvidade. Estas observações são, para os dois conjuntos de resultados, compatíveis com zonas de retenção de água; a presença de água aumenta a condutividade. De uma maneira geral verifica-se que nas zonas onde há sobreposição de dados de EM e GPR, os dados de EM são compatíveis com as interpretações feitas a partir da análise dos resultados de GPR isoladamente. Facto que ajuda a validar os modelos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi cofinanciado pela União Europeia através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, enquadrado no COMPETE 2020 (Programa Operacional da Competitividade e Internacionalização) através do projeto ICT (UID/GEO/04683/2013) com a referência POCI-01-0145-FEDER-007690 e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento

Regional (FEDER), através do programa INALENTEJO, no âmbito do projeto IMAGOS – Innovative Methodologies in Archaeology, Archaeometry and Geophysics – Optimizing Strategies X APOLLO – Archaeological and Physical On-site Laboratory – Lifting Outputs (ALENT-07-0224-FEDER-001760).

BIBLIOGRAFIA

- Beres, M., Luetscher, M., & Olivier, R. 2001. «Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves». *Journal of Applied Geophysics*, 46(4), 249-262.
- Doolittle, J. A., & Collins, M. E. 1998. «A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst». *Geoderma*, 85 (1), 83-102.
- El-Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M. A., & Ushijima, K. 2005. «Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar». *Journal of Cave and Karst studies*, 67 (3), 174-181.
- Fernandes, R., Arias, P., Diniz, M., Tátá, F., Rodrigues, P. & Rocha, L. 2015. «A Lapa do Sono (Sesimbra Portugal) News about a Neolithic funerary context», *Papers from the II International Conference of Transition Archaeology: Death Archaeology*, BAR International Series 2708, 29-34.
- Lazzari, M., Loperte, A., & Perrone, A. 2010. «Near surface geophysics techniques and geomorphological approach to reconstruct the hazard cave map in historical and urban areas». *Advances in Geosciences*, 24 (24), 35-44.
- Milson, John 2003. *Field Geophysics* third edition. John Wiley and Sons Ltd. Chichester.
- Reynolds, J.M. 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley and Sons, England.