

# Aplicação do Radar de Penetração no Solo (GPR) na detecção de estruturas no âmbito nas Ciências Forenses

Vânia Lourenço, Bento Caldeira, João Rocha, Mourad Bezzeghoud, José Borges

Centro de Geofísica de Évora e Departamento de Física da Universidade de Évora

vanielou@hotmail.com

## Resumo

Na base do fulgurante desenvolvimento da ciência forense está a incorporação do conhecimento e técnicas de várias especialidades científicas, onde a física ocupa lugar de relevo. Um exemplo desta articulação é o GPR (*Ground Penetrating Radar*, Radar de Penetração no Solo), que assume hoje grande importância na detecção de objectos e cadáveres enterrados. Este trabalho descreve um estudo sobre os limites de aplicabilidade do GPR em investigação forense. Foram concebidos e desenvolvidos ensaios laboratoriais (para aferir parâmetros físicos e técnicas de tratamento de dados) e de campo (onde se estudaram as condições de detectabilidade de artefactos metálicos e cadáveres de porcos enterrados). Os resultados mostram o potencial de aplicação da técnica para este fim e a possibilidade de se estimar o estado de decomposição dos cadáveres.

## Introdução

Um dos domínios de aplicação das ciências forenses prende-se com a localização de provas ocultadas no subsolo. Quando as buscas através de escavações são inviáveis por razões funcionais, tais como a presença de estruturas cujo desmantelamento é complexo; risco de destruição de provas ou; grande extensão da áreas de investigação, a resposta só pode vir por intervenção das técnicas da Geofísica. À aplicação da Geofísica neste campo dá-se o nome de Geofísica Forense. Qualquer método não invasivo, capaz de reduzir o tempo dispendido em pesquisas e escavações ou que aumente a probabilidade de localização física das provas, tem interesse relevante em Geofísica Forense. Um dos métodos que se enquadra nesse domínio é o GPR, que ultimamente tem vindo a dar provas da sua eficácia num largo espectro de aplicações geotécnicas e geológicas [1], e também, dada a sua natureza versátil, encontra nas ciên-

cias forenses um domínio importante de utilização. Diferencia-se dos demais métodos geofísicos por fornecer uma visualização detalhada das camadas próximas da superfície, possibilitada pela análise das ondas electromagnéticas reflectidas nessas camadas, e pela enorme flexibilidade de operação (equipamento leve e portátil) o que permite a cobertura rápida de grandes áreas [2].

Neste trabalho, é apresentado um estudo sobre o potencial de aplicação da técnica GPR para procurar corpos enterrados, feito em condições similares às encontradas em investigação forense. Para tal concebemos e implementámos um conjunto de situações experimentais que envolveram o enteramento de artefactos metálicos e cadáveres de animais para posterior detecção por GPR, mediante diferentes propriedades do terreno e das amostras enterradas. O trabalho surgiu no âmbito da unidade curricular "Projecto de Física" da licenciatura em Física da Universidade de Évora, onde se pretende que o estudante tenha um primeiro contacto com a investigação científica. Para isso deve propor e desenvolver um tema de investigação. Neste caso o trabalho foi também apoiado com uma bolsa BII no âmbito do Projecto de investigação SISMOD/LIS-MOT em curso no Centro de Geofísica de Évora.

## Fundamentos do GPR

A tecnologia GPR é constituída por um gerador que emite impulsos de ondas electromagnéticas através de uma antena transmissora (Tx). Essas ondas electromagnéticas são difundidas a partir da antena Tx para o meio em estudo onde se propagam com velocidade determinada principalmente pela permi-

tividade do meio ( $\epsilon$ ). Quando encontram no seu percurso objectos com diferentes propriedades eléctricas, sofrem desvios (refracção, reflexão e difracção). Parte da radiação emitida retorna à superfície onde é captada por uma antena receptora (Rx) (Figura 1), digitalizada e gravada num dispositivo de armazenamento digital para posterior interpretação.

O fundamento da aplicação de GPR para visualizar o interior das estruturas está na relação entre a velocidade das ondas e as propriedades do material. Tal como na sísmica de reflexão, a informação que se obtém das estruturas é conseguida a partir da interpretação dos intervalos de tempo que as ondas demoram a viajar desde que são emitidas até serem detectadas, depois de reflectidas nas descontinuidades que encontram – interfaces [4]. A ordem de grandeza típica dos tempos de viagem das ondas electromagnéticas observados é o nanosegundo. O principal factor que determina a profundidade de penetração das ondas emitidas pelo GPR é a frequência de operação. Em geral os equipamentos de GPR podem operar em diversas frequências, porém a cada frequência que se utilize corresponde uma

antena diferente. A escolha da frequência/antena a utilizar depende do objectivo do levantamento (dimensões e profundidade do alvo) assim como dos parâmetros físicos do meio, isto é, das condições geológicas locais. Quanto maior for a frequência das ondas usadas, maior será a definição das imagens a produzir; porém, menor é a penetração. A Tabela 1 apresenta a frequência/profundidade para cada antena.

A velocidade das ondas electromagnéticas  $v$  em qualquer meio é função da velocidade da luz no vácuo ( $c=0,3$  m/ns), da permissividade relativa (ou constante dieléctrica)  $K$ , cujos valores são tabelados [6], da permeabilidade magnética relativa  $\mu$ , e do factor de perda  $P$ ,

$$v = \frac{c}{\sqrt{\frac{K\mu}{2} (1 + \sqrt{1 + P^2})}} \quad (1)$$

em que  $P$  é dado por  $P = \sigma/\omega\epsilon$ , sendo  $\sigma$  a condutividade,  $\omega=2\pi f$  a frequência angular, e  $\epsilon = K\epsilon_0$  a permissividade do meio, sendo  $\epsilon_0$  a permissividade do vácuo ( $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m).

Para materiais não magnéticos ( $\mu = 1$ ), com factores de perda baixo ( $P \approx 0$ ), como areias ou outros solos comuns, a velocidade das ondas electromagnéticas (1) reduz-se a

$$v = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (2)$$

As equações (1) e (2), atendendo aos valores dos parâmetros das constantes dieléctricas típicos dos solos, mostram que a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no solo é menor que no ar.

Em grande parte das utilizações de GPR, e também neste estudo, os dados são adquiridos mediante uma técnica denominada por perfil de reflexão de radar (*radar reflection profiling*), em que uma ou mais antenas de radar são deslocadas ao longo da superfície do solo em simultâneo. À medida que são registadas pelo equipamento, as leituras são representadas graficamente no ecrã; os tempos de percurso até ao reflector são representados no eixo vertical e a distância percorrida pela antena é mostrada no eixo horizontal.

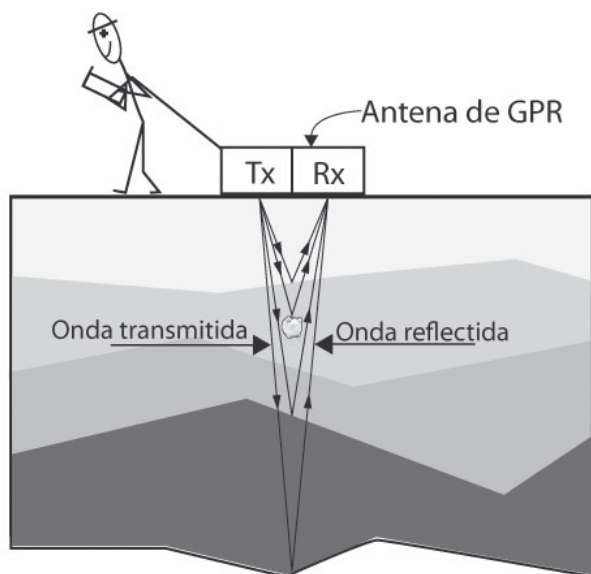


Fig. 1 - Diagrama que esquematiza a aquisição de dados por GPR.

Frequência	Aplicações	Profundidade de penetração aproximada (m)
2,6 GHz	Inspecções em cimento	0 - 0,30
1,5 / 1,6 GHz	Inspecções em cimento	0 - 0,50
900 MHz	Inspecções em cimento, identificação de vazios, arqueologia	0 - 1
400 MHz	Engenharia, meio ambiente, identificação de vazios, arqueologia	0 - 4
270 MHz	Geologia, engenharia, meio ambiente, arqueologia	0 - 6
200 MHz	Geologia, engenharia, mineração, meio ambiente, arqueologia	0 - 9
100 MHz	Geologia, meio ambiente, mineração, arqueologia	0 - 15
16 - 80 MHz	Geologia	0 - 50

Tabela 1 - Frequências utilizadas por várias antenas, aplicações mais frequentes e alcance em profundidade [8].

	Constante dielétrica	Condutividade (mS/m)	Velocidade (m/ns)	Atenuação (dB/m)
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	0,002
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	30000	0,01	1000
Areia seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1,0	0,06	0,03-0,3
Calcário	4 - 8	0,5-2	0,12	0,4-1
Xisto	5 - 15	1-100	0,09	1-100
Lodo	5 - 30	1-100	0,07	1-100
Argila	4 - 40	2-1000	0,06	1-300
Granito	4 - 6	0,01-1	0,13	0,01-1
Sal (seco)	5 - 6	0,01-1	0,13	0,01-1
Gelo	3 - 4	0,01	0,16	0,01

Tabela 2 - Propriedades eléctricas do meio [3]

Para pequenas distâncias entre o receptor e o emissor relativamente à profundidade total, o tempo de percurso pode ser convertido em profundidade  $d$  através do produto da velocidade média de propagação da radiação  $v$  do meio em estudo (Tabela 2) por metade do tempo de percurso  $t$  (Fig. 1). Considerando que o receptor se encontra afastado do emissor por uma distância  $x$  (*offset*) então a equação exacta é:

$$d = 0.5(v^2t^2 + x^2)^{1/2} \quad (3)$$

Os dados registados são posteriormente tratados através de software específico, que aplica algoritmos desenvolvidos para a produção de imagens radar (radargramas) cuja interpretação permite “ver” o interior das estruturas [5].

### Situações em análise

Para vencer a limitada experiência que detínhamos sobre a técnica no princípio do projecto, foi desenvolvida uma metodologia de treino para colmatar a falha. Assim, na fase inicial do projecto, o GPR foi utilizado em ambiente laboratorial, de forma a permitir ganhar prática na utilização desta

técnica geofísica, tanto ao nível das técnicas de aquisição de dados, como de leitura e tratamento desses dados para obtenção de resultados. Para os ensaios laboratoriais foram criadas situações experimentais de fácil manuseamento e interpretação. Por fim planearam-se e desenvolveram-se um conjunto de ensaios com situações próximas da realidade da investigação forense.

O equipamento usado foi um sistema GPR, SIR System-3000 (equipamento da GSSI), com as antenas de frequência 1,5/1,6 GHz e 400 MHz, tudo disponibilizado pelo Centro de Geofísica de Évora (CGE). O tratamento dos dados foi feito com a utilização do software RADAN 6.5.

### Ensaio laboratoriais

Os ensaios laboratoriais foram feitos sobre uma estrutura de areia da praia, depositada no interior de uma caixa acrílica transparente com aproximadamente 45 cm de comprimento, 25 cm de largura e 25 cm de altura. Esta estrutura de areia era composta por duas camadas com granulagens diferen-



Fig. 2 - Experiência laboratorial. À esquerda: cilindro utilizado; ao centro: caixa de acrílico com cilindro metálico enterrado; à direita: panorâmica de todo o equipamento utilizado.



Fig. 3 - Radargramas do cilindro metálico. Esquerda: leitura em tempo real, sem qualquer tratamento; direita: depois de analisados através do software RADAN.

tes: a inferior de areia mais fina (~2 mm) e a superior de areia grossa (~5-6 mm). No interior da estrutura de areia foi enterrado um cilindro de ferro com 5 cm de diâmetro e massa 1 kg. Devido às reduzidas dimensões da caixa e à baixa profundidade a que o cilindro pode ser enterrado, optámos por utilizar a antena de 1,5/1,6 GHz que tem um alcance padrão máximo de 0,5 m (ver Figura 2). A partir desta disposição foram feitas leituras mediante várias configurações do equipamento, diferentes profundidades do cilindro e vários estados de humidade da areia. Com este conjunto de ensaios foi possível analisar quais as configurações que produzem melhores resultados para cada situação.

A Figura 3 (esquerda) mostra uma fotografia do ecrã do GPR no momento da aquisição de dados sobre a estrutura descrita, com o cilindro enterrado a 7 cm da superfície, conforme mostrado na Figura 2. É uma imagem obtida sem qualquer tratamento. A Figura 3 (direita) corresponde a uma imagem obtida, por processamento dos mesmos dados, com o software RADAN 6.5.

### Ensaio de campo

A definição dos ensaios de campo teve subjacente a ideia de se criarem condições próximas das encontradas pela investigação forense. Para isso foi contactado o Instituto de Investigação Forense da PJ no sentido de nos prestar ajuda na definição das situações a simular: sepulturas clandestinas com cadáveres em vários estados de decomposição e armas enterradas. Para os ensaios com sepulturas usámos dois cadáveres de porco. A razão da escolha reside no facto da constituição dos seus tecidos biológicos de superfície responderem às ondas de radar de forma similar aos tecidos da superfície do corpo humano [7]. O local escolhido para os enter-



Fig. 4 - Fotografias captadas no dia do enterramento dos porcos. Esquerda: cova aberta; direita: enterramento de porco (~0,80 m).

ramentos foi a Herdade da Mitra, pertencente à Universidade de Évora, em terreno identificado pela geologia com a designação de granito alterado.

#### a) Sepulturas

A primeira fase do trabalho de campo destinou-se ao reconhecimento do terreno, à escolha do sítio e sua marcação para escavação. Após a escolha foi feita uma primeira leitura com GPR no local escolhido para o enterramento dos porcos.

Seguidamente, uma retroescavadora abriu a cova a uma profundidade de 1,6 m tendo em vista um cenário de sepultura clandestina. Dias mais tarde foram cedidos pelo Hospital Veterinário da Universidade de Évora dois cadáveres de pequenos porcos, com cerca de 80 cm de comprimento, que após submetidos a experiências de laparoscopia tiveram que ser abatidos. Como a sepultura aberta nos pareceu demasiado funda, colocámos terra até se atingir uma profundidade de 1,15 m onde foi depositado o primeiro cadáver; o outro depositado um pouco mais acima, a 0,80 m da superfície (Figura 4).

Para a aquisição de dados nesta experiência foi seleccionada a antena de 400 MHz, por ser a que garante melhor relação alcance/resolução nesta situação. Tem um alcance padrão da ordem dos 4 m e permite obter imagens nestas condições experimentais, com definição suficiente para a identificação dos objectos procurados.

Foi definido um programa de leituras, durante as 12 semanas após o enterramento, para acompanhar a evolução da imagem GPR durante a decomposição. Para garantir o mesmo posicionamento dos perfis de leitura durante todo o programa e assegurar a definição exacta da posição das medidas, foi inscrita uma grelha sobre um tapete que foi fixado sobre a sepultura (Figura 5).

#### b) Armas

Para conseguirmos objectos que produzissem radargramas semelhantes aos produzidos por armas, usámos vários objectos metálicos com os quais montámos dois artefactos, um com a forma e dimensão próximas de uma pistola (20 cm), que designamos por “pistola” (Figura 6); o outro, maior (~40 cm), com uma forma que faz lembrar um lança-morteiros, que denominamos “bazuca”. Estas armas foram enterradas a uma profundidade de 0,30 m, num local próximo da sepultura. Nestes ensaios, como os objectos foram enterradas muito à superfície, foi possível serem usadas as antenas de 400 MHz e a de 1,5/1,6 GHz.

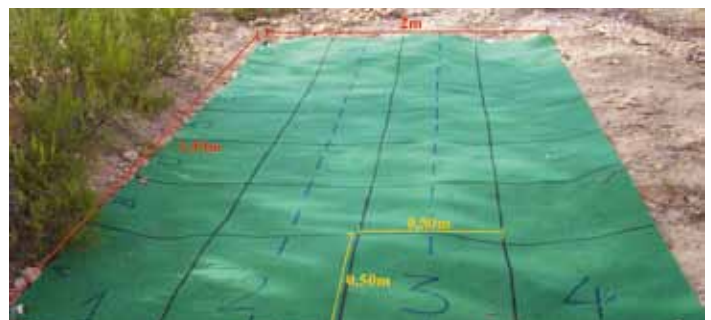


Fig. 5 - Tapete a cobrir a sepultura, onde foi inscrita uma malha quadrada de 0,50 m para guiar a antena.





Fig. 6 - Fotografias captadas durante o enterramento das armas. A da esquerda mostra a "pistola" e a da direita a "bazuca". Foram ambas enterradas à profundidade de 30 cm.

## Resultados

Os dados adquiridos com o GPR foram analisados utilizando o software RADAN 6.5. A primeira fase consistiu na procura da paleta de cores que permitisse o melhor contraste dos radargramas registados; seguidamente foram testados e aplicados os filtros que permitiram a melhor leitura: 1) desconvolução; 2) "stacking" para potenciar o sinal; 3) migração Kirchhoff.

A interpretação dos radargramas obtidos durante todo o período de leituras, tanto no caso da sepultura como no das armas, revela com clareza a presença dos objectos enterrados (Figuras 7 e 8), permite determinar a localização superficial exacta e ainda estimar tanto as suas dimensões como a profundidade a que se encontram. No caso dos cadáveres consegue-se uma boa visualização do limite da sepultura, assim como uma nítida assinatura do local onde estes foram depositados. Ao longo da decomposição assistimos a uma alteração nos contornos dos cadáveres, que consideramos dever-se à libertação de fluidos que alteram as propriedades dieléctricas do meio envolvente.

No caso da detecção das armas, a comparação dos radargramas obtidos com antenas de 400 MHz e de 1,5/1,6 GHz (Fig. 8) evidencia a diferença nos detalhes conseguidos com as duas antenas. Os radargramas obtidos com a antena de 400 MHz revelam a presença de um reflector, com localização difusa, sem qualquer possibilidade de definição de contornos; já os obtidos, nas mesmas condições, com a antena de 1,5/1,6 GHz permitem uma boa indicação da profundidade e mesmo uma avaliação aproximada da dimensão e forma do objecto escondido.

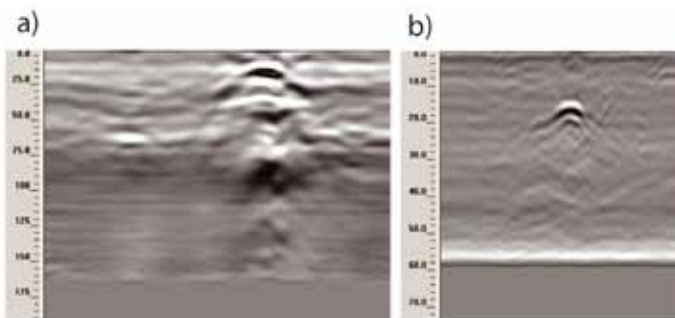


Fig. 8 - Radargramas das armas obtidos com as diferentes antenas: (a) 400 MHz; (b) 1,5/1,6 GHz.

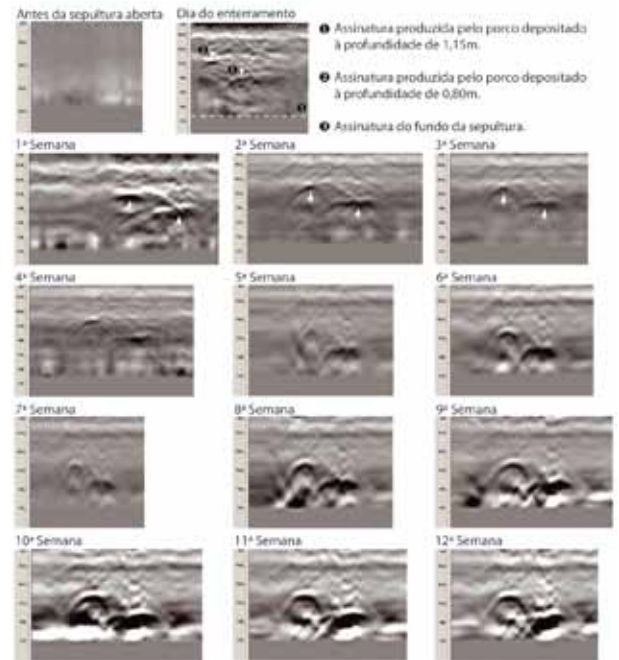


Fig. 7 - Radargramas obtidos nas várias fases do trabalho, no mesmo local e nas mesmas condições experimentais. Começando quando a sepultura ainda não tinha sido aberta, imediatamente após o enterramento e semanalmente durante as primeiras 12 semanas de decomposição.

## Discussão e conclusão

Os resultados mostram que o GPR encontra na investigação criminal um fértil campo de aplicação. Através desta técnica é possível cobrir grandes áreas em pouco tempo e detectar com precisão objectos mesmo de dimensões reduzidas (da ordem de grandeza da dimensão de uma pistola), proeza impossível de alcançar pelos meios tradicionais. Relativamente à sua aplicação para a detecção de cadáveres, permite proceder à detecção imediatamente a seguir ao enterramento, contrariamente às também utilizadas técnicas eléctricas que só o conseguem fazer após estado avançado de decomposição.

As experiências realizadas levam-nos a concluir que o método é bastante eficiente e rápido na aquisição e tratamento de dados. Um operador experiente consegue interpretar os dados em tempo real à sua aquisição. Com uma boa parametrização do equipamento, é inclusivamente possível fazer-se uma estimativa do estado de decomposição do corpo, tendo um bom conhecimento do terreno.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), através da bolsa BII no âmbito do projecto SISMOT/LISMOT PTDC/CTE-GIN/82704/2006. Agradecemos as colaborações: da Sociedade Agrícola ZEA pela disponibilização do campo de ensaios e abertura das sepulturas; do hospital Veterinário da Universidade de Évora pela cedência dos cadáveres dos porcos; da Dra. Fátima Machado do Laboratório da Polícia Científica pelas sugestões para a definição dos ensaios.

## Referências

- [1] N. Blindow, "Ground Penetrating Radar" in "Environmental Geology: Handbook of field methods and case studies" (K. Knödel, G. Lange, e H. J. Vight, eds.); Springer-Verlag 283-336 (2007).
- [2] D. J. Daniels, "Ground Penetrating Radar" (Cap. 12: Forensic Applications), 423-436; IET (Londres, 1997)
- [3] J. L. Davis, e A. P. Annan, "Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy", *Geophysical Prospecting* 37, 531-551 (1989).
- [4] O. C. Gandolfo, L. A. Sousa, M. G. Tessler, M. Rodrigues, "Estratigrafia Rasa da Ilha Comprida (SP): Um exemplo de aplicação do GPR", *Rev. Brasileira de Geofísica* 19(3), 251-262 (2001).
- [5] GSSI, RADAN 6.5 User's Manual, GSSI, Estados Unidos (2007).
- [6] J. M. Reynolds, "An Introduction To Applied and Environmental Geophysics" (Cap. 12: Ground Penetrating Radar ), 681-749; Wiley (Toronto, 1997).
- [7] K. Powell, "Detecting buried human remains using near-surface geophysical instruments", *Exploration Geophysics* 35, 88-92 (2004).
- [8] Referências em <http://www.alphageofisica.com.br/gssi/gpr.htm>



### Mourad Bezzeghoud

é licenciado em Eng. Geofísica pelo Inst. Nat. des Hydrocarbures et de la Chimie (Argélia, 1981), possui um mestrado (DEA) em Geofísica interna e Geoquímica e um doutoramento na área da Sismologia (U. Denis Diderot, Paris, 1987). Realizou a agregação em Ciências da Terra e do Espaço (2011) na U. de Évora. Foi docente na U. Pierre et Marie Curie (Paris, 1986-88), investigador e Diretor de Depto. no Centre en Astronomie, Astrophysique et Géophysique de Argel (1988-94) onde fundou o Depto. de Sismologia e liderou a instalação das primeiras redes sísmica telemétrica e geodésica em Argélia. Foi professor/investigador convidado na École National des Mines de Paris (1985), na U. Complutense de Madrid (1996 e 2010) e na École Normal Supérieure de Paris (2011). É investigador no CGE desde 1997 e professor associado no Depto. de Física da U. Évora desde 2003, onde desempenha vários cargos de coordenação e de direção. É vice-diretor do CGE desde 2003 e lidera o grupo de investigadores no domínio da Terra Sólida do mesmo centro. Dedicar a sua investigação à Geofísica/Sismologia, nomeadamente ao estudo do fenómeno sísmico e ao risco a ele associado. Tem publicado vários trabalhos na área da Sismologia e Sismotectónica, nomeadamente estudos sobre os processos de rutura sísmica na região Ibero-magrebina.



**Vânia Lourenço** é licenciada em Física pela Universidade de Évora em 2009. Foi bolseira da FCT onde desenvolveu investigação na área da geofísica forense no Centro de Geofísica de Évora da Universidade de Évora, com resultados apresentados em congressos. Atualmente frequenta o Mestrado de Física Médica na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.



**Bento Caldeira** é licenciado em Física pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra; Mestre e Doutoramento em Física pela Universidade de Évora, é professor no Departamento de Física da Universidade de Évora e investigador no Centro de Geofísica de Évora. Integra vários projetos de investigação nacionais e internacionais na área da Geofísica Interna (Sismologia, Risco sísmico e aplicação de métodos geofísicos à Arqueologia). Em complemento à atividade no ensino superior e na investigação desenvolve trabalho com professores e estudantes de Física do Ensino Secundário.



**João Pedro Rocha** é licenciado em Eng. Geológica e mestre em Geofísica pela Universidade de Évora, respetivamente, em 2007 e 2010. Bolseiro da FCT, integrou a equipa de geofísica interna no Centro de Geofísica de Évora da Universidade de Évora (CGE/

UE) onde desenvolveu investigação na área da sismologia e geofísica aplicada, com resultados apresentados em congressos e publicados em revistas internacionais. Faz parte duma equipa do CGE/UE que integra a maior expedição de investigadores portugueses à Antárctida Marítima para estudar o *permafrost* e suas reações com as alterações climáticas.



**José Fernando Borges** é licenciado e mestre pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e doutorado em Física pela Universidade de Évora, é professor no Departamento de Física desta última Universidade e investigador no Centro de Geofísica

de Évora. Integra equipas de investigação em diversos projetos nacionais e internacionais em áreas como a sismologia, Risco sísmico, Fonte sísmica, Arqueometria, tendo vindo a dedicar especial atenção nos últimos anos à predição de movimentos sísmicos intensos na região do Vale Inferior do Tejo. Presentemente desempenha as funções de coordenador do grupo de investigação na área da Geofísica Interna/Sismologia do Centro de Geofísica de Évora.