

**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Tomaz William da Assunção

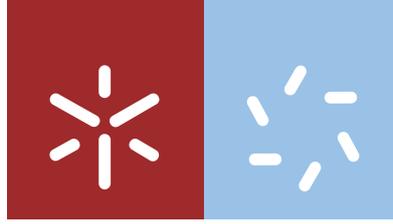
**Aplicação do Método Geofísico de Georradar  
em contexto de exploração mineira  
– Caso Prático do Eluvião da Bejanca**

Aplicação do Método Geofísico de Georradar em contexto de exploração mineira  
– Caso Prático do Eluvião da Bejanca

Tomaz William da Assunção

UMinho | 2016

outubro de 2016



**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Tomaz William da Assunção

**Aplicação do Método Geofísico de Georradar  
em contexto de exploração mineira  
– Caso Prático do Eluvião da Bejanca**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Geociências  
Ramo Valorização de Recursos Geológicos

Trabalho realizado sob orientação do  
**Professor Doutor Luís Miguel Barros Gonçalves**

*"Veni, vidi, vici"*

- Gaius Julius Caesar (general e cōsul romano)



## Agradecimentos

Gostaria de manifestar os meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Professor Doutor Luís Miguel Barros Gonçalves, pelo seu entusiasmo e apoio demonstrado ao longo da realização desta dissertação. A sua disponibilidade durante a fase de aquisição de dados foi fundamental para o sucesso deste trabalho, assim como todas as suas sugestões e correções. Por tudo isto registo aqui a minha sincera gratidão.

No âmbito profissional gostaria de agradecer à Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. e em especial ao Engenheiro Adriano Barros pelos dados disponibilizados referentes à campanha de amostragem, bem como o facto de terem contribuído nas deslocações a Viseu. Gostava de deixar aqui o meu apreço pela oportunidade que me deu ao serviço da Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda.

Ao geólogo Vítor Arezes, pela amizade e por todo o apoio que me deu durante e após o meu tempo de serviço com a Minerália, um muito obrigado.

À Mara Dória, por toda a sua disponibilidade de troca de impressões e sugestões, assim como pela amizade, motivação e apoio que me deu.

Ao Hugo Ribeiro, Pedro Alves e Bruno Dias pela amizade e apoio que sempre demonstraram.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação.

Em especial aos meus pais, Susan e Luís, e à minha irmã Katie, por todo o apoio e motivação. Apesar de longe estão sempre perto.

E à Eduarda por todo o amor, apoio, compreensão, carinho e motivação que me deu durante toda esta demanda. Mesmo nos momentos de desânimo sempre me deu força.



## Resumo

**Palavras-chave:** Georradar, geofísica, prospeção, processamento de dados, radargrama, substrato, cálculo volumétrico, tonelagem, eluvião.

Esta dissertação incide sobre a aplicação de uma técnica de prospeção geofísica não destrutiva, nomeadamente o Georradar, também designado, na nomenclatura anglo-saxónica, por Ground-Penetrating Radar (GPR).

O presente trabalho descreve a aplicação do Georradar em contexto de potencialidade mineira, utilizando como caso prático o eluvião da Bejanca, localizado no concelho de Vouzela, na região centro (Viseu). Tendo assim como objetivos: a definição de uma metodologia prospetiva e de aquisição de dados que se adeque ao contexto mineiro local; a avaliação das potencialidades do equipamento de Georradar em detetar o substrato rochoso dos locais estudados; a avaliação da eficácia das antenas de 200 e 400 MHz; a definição de uma metodologia de processamento; a delimitação do substrato rochoso e o cálculo da volumetria e da tonelagem de cada área estudada.

No âmbito desta dissertação foram escolhidas três áreas de estudo, ficando a seleção destas dependente de alguns fatores, como: a localização dos poços exploratórios realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda.; terrenos que evitassem demasiados problemas de acoplamento da antena ao solo, como a presença de vegetação densa e de obstáculos que dificultassem a realização dos perfis; e o consentimento dos proprietários dos terrenos em autorizar a realização da prospeção.

O equipamento geofísico utilizado para aquisição dos dados foi o TerraSIRch SIR System-3000, desenvolvido pela GSSI, juntamente com as antenas blindadas de 200 MHz e 400 MHz, em modo mono-estático. Os radargramas obtidos foram processados com o *software* ReflexW.

Uma vez concluído o processamento dos dados, os resultados finais foram analisados e visualizados através de: radargramas individuais; mapas de isolinhas e imagens tridimensionais. As imagens tridimensionais permitiram calcular o volume de sedimentos de cada área estudada, ao passo que os resultados daí decorrentes foram utilizados para os cálculos, teóricos, da tonelagem das três áreas sob investigação.

Conclui-se que a aplicação deste método geofísico permitiu definir com precisão a estratigrafia dos locais estudados, com especial destaque para a posição do substrato rochoso, tendo sido possível definir a volumetria e tonelagem de cada área investigada. Para uma abordagem inicial sobre a área do eluvião da Bejanca, considera-se que a metodologia empregue, tanto na fase de aquisição, como na fase de processamento e visualização de dados foi a mais adequada.



## Abstract

**Keywords:** Georadar, geophysics, prospecting, data processing, radargram, substrate, volumetric calculation, tonnage, eluvium.

This thesis focuses on the use of a non-destructive geophysical exploration technique - the Georadar, also known as Ground Penetrating Radar (GPR).

The present research describes the application of Georadar in a potential mining context using as a case study the Bejanca eluvium located in the municipality of Vouzela in the central region of Portugal (Viseu), and has the following objectives: the definition of a prospective methodology and data acquisition that fits the local mining context; assessment of the Georadar equipment in detecting the bedrock of the studied sites; evaluation of the efficiency of the 200 and 400 MHz antennas; defining a processing methodology; the delimitation of the bedrock and the calculation of the volume and tonnage of each studied area.

Within the context of this dissertation three areas were studied, leaving the selection of these dependent on factors such as: the location of the exploratory wells made by Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda.; areas that avoided too many antenna coupling issues with the surface such as the presence of dense vegetation and obstacles that could interfere with the acquisition of the profiles; and the consent of the land owners in authorizing the prospection works.

The equipment used in the acquisition of the geophysical data was the TerraSIRch SIR System-3000, developed by GSSI, along with the 200 MHz and 400 MHz shielded antennas, in mono-static mode. The obtained radargrams were processed with the ReflexW *software*.

After processing the data the final results were analysed and visualized through: individual radargrams; contour maps and three-dimensional images. Three-dimensional images were used to calculate the volume of each studied area, whereas the results arising therefrom were used for the theoretical calculations of the tonnage of the three areas under investigation.

It was concluded that the application of this geophysical method it is possible to define accurately the stratigraphy of the studied sites, with special emphasis on the location of the bedrock. It was also possible to set the volume and tonnage of each study area. For an initial approach to the area of the Bejanca eluvium, we consider that the methodology used both in the acquisition phase and during the processing and data visualization phase was the most adequate.



# Índice Geral

Agradecimentos.. . . . .	.v
Resumo.. . . . .	vii
Abstract .. . . . .	ix
Índice Geral .. . . . .	xi
Índice de Figuras.. . . . .	xiii
Índice de Tabelas.. . . . .	xv
Lista de Abreviaturas.. . . . .	xvii
Lista de Símbolos.. . . . .	xix
<b>1. Introdução .. . . . .</b>	<b>1</b>
1.1. Considerações gerais.. . . . .	1
1.2. Objetivos da dissertação.. . . . .	2
1.3. Estrutura da dissertação.. . . . .	3
<b>2. O Georradar como ferramenta de prospeção.. . . . .</b>	<b>5</b>
2.1. Estado da Arte.. . . . .	5
2.1.1. Notas históricas.. . . . .	5
2.1.2. A utilização do Georradar em Portugal.. . . . .	7
2.2. Fundamentos teóricos do Georradar.. . . . .	9
2.2.1. Natureza das ondas eletromagnéticas.. . . . .	9
2.2.2. Propriedades eletromagnéticas dos materiais.. . . . .	11
2.2.2.1. Condutividade elétrica.. . . . .	12
2.2.2.2. Permitividade elétrica.. . . . .	13
2.2.2.3. Permeabilidade magnética.. . . . .	14
2.2.3. Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas.. . . . .	15
2.2.4. Profundidade de penetração.. . . . .	16
2.2.5. Resolução.. . . . .	17
2.2.6. Coeficiente de reflexão e transmissão.. . . . .	19
2.2.7. Perda e atenuação da energia de Radar.. . . . .	21
2.3. Descrição e princípio de funcionamento do Georradar (GPR) .. . . . .	23
2.3.1. Equipamento Georradar.. . . . .	23
2.3.2. Modo de funcionamento.. . . . .	24
2.4. Métodos de aquisição de dados.. . . . .	25
2.4.1. Reflexão.. . . . .	26
2.4.2. Ponto médio comum (CMP) .. . . . .	26
2.4.3. Tomografia.. . . . .	27
2.5. Processamento dos dados.. . . . .	28
2.5.1. Pré-processamento.. . . . .	28
2.5.2. Move starttime.. . . . .	29
2.5.3. Filtros de frequência.. . . . .	29
2.5.4. Dewow (subtract-mean) e Subtract-DC-shift.. . . . .	29
2.5.5. Ganhos – AGC (Automatic Gain Control) .. . . . .	30
2.5.6. Background removal.. . . . .	30
2.5.7. Análise da velocidade e conversão em profundidade.. . . . .	30
<b>3. Trabalho prático desenvolvido – Caso de estudo.. . . . .</b>	<b>33</b>
3.1. Enquadramento do caso de estudo.. . . . .	33
3.1.1. Enquadramento Geológico.. . . . .	34

3.1.1.1. Rochas Granitóides Tardi a Pós – Tectónicas (relativamente a D3) .....	35
3.1.1.2. Depósitos de cobertura do Cenozóico (Neogénico - Quaternário) .....	36
3.1.2. Enquadramento Geomorfológico e Hidrogeomorfológico .....	36
3.2. Equipamentos e software .....	37
3.2.1. Equipamento utilizado .....	37
3.2.2. Software utilizado .....	40
3.3. Método de trabalho .....	41
3.3.1. Seleção das áreas de estudo .....	41
3.3.2. Regras de boas práticas de operação com Georradar .....	42
3.3.3. Definição de parâmetros de aquisição de dados .....	44
3.3.4. Aquisição de dados .....	45
3.3.5. Processamento de dados .....	45
3.4. Tratamento e interpretação de dados .....	46
3.5. Modelação 3D e Cálculo de Volumes .....	49
3.6. Resultados .....	51
3.6.1. Local de Estudo – Área 1 .....	51
3.6.2. Local de Estudo – Área 2 .....	53
3.6.3. Local de Estudo – Área 3 .....	54
<b>4. Discussão dos resultados .....</b>	<b>57</b>
4.1. Visualização e interpretação dos dados .....	57
4.2. Cálculo do volume e tonelagem .....	59
<b>5. Considerações finais .....</b>	<b>61</b>
5.1. Conclusões .....	61
5.2. Trabalhos futuros e recomendações .....	62
<b>6. Bibliografia .....</b>	<b>65</b>

## ANEXOS

Anexo 1 .....	77
Anexo 2 .....	91
Anexo 3 .....	95
Anexo 4 .....	99
Anexo 5 .....	117
Anexo 6 .....	123
Anexo 7 .....	129
Anexo 8 .....	139
Anexo 9 .....	143



<b>Figura 14</b> – Excerto da Carta Militar de Portugal nº 177 - Vouzela, à escala 1:25000, com sobreposição do relevo (Instituto Geográfico do Exército, 1999). A vermelho encontra-se a área correspondente ao eluvião da Bejanca (área: 2.97 Km <sup>2</sup> ) (adaptado com base na Carta Geológica de Portugal, Folha 17-A (Viseu), do Instituto Geográfico do Exército, 2008; e no documento “Sampling and Evaluation of the Bejanca Eluvius”). Sistema de coordenadas: WGS 84/UTM zone 29N.. . . . .	37
<b>Figura 15</b> – Equipamento de Georradar utilizado no decurso desta dissertação, produzido pela GSSI: antenas de 200 MHz e 400 MHz; SIR-3000; <i>survey wheel</i> com odómetro e cabos de ligação.. . . . .	38
<b>Figura 16</b> – Exemplo da ficha tipo para anotações de campo. Na mesma ficha constam os dados das antenas de 200 e 400 MHz. Os dados a azul foram pré-introduzidos em cada ficha-tipo, uma vez que não alteram.. . . . .	43
<b>Figura 17</b> – Ambiente de trabalho do <i>software</i> ReflexW 2D Data Analysis versão 7.5.9, com indicação das principais ferramentas utilizadas para este trabalho.. . . . .	46
<b>Figura 18</b> – Sequência de processamento utilizada sobre os dados recolhidos em campo.. . . . .	47
<b>Figura 19</b> – Área de investigação 1 (A1), composta pelos campos A, B, C, D e E. A amarelo estão os poços abertos durante a campanha de amostragem. Altitude de visualização: 235 m.. . . . .	52
<b>Figura 20</b> – Radargramas correspondentes ao Campo A, Perfil 1, com a devida interpretação. Orientação: S - N. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade dos poços realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F_040. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 93.74 m; B) Identificação F_056. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 93.78 m.. . . . .	52
<b>Figura 21</b> – Área de investigação 2 (A2), composta pelo campo F. A amarelo estão os poços abertos durante a campanha de amostragem. Altitude de visualização: 259 m.. . . . .	53
<b>Figura 22</b> – Radargramas correspondentes ao Campo F, Perfil 17, com a devida interpretação. Orientação: E - O. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade dos poços realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F_076. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 200.58 m; B) Identificação F_072. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 200.98 m.. . . . .	54
<b>Figura 23</b> – Área de investigação 3 (A3), composta pelo campo G. A amarelo estão os poços abertos durante a campanha de amostragem. Altitude de visualização: 192 m.. . . . .	55
<b>Figura 24</b> – Radargramas correspondentes ao Campo G, Perfil 21, com a devida interpretação. Orientação: E - O. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade do poço realizado pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F_080. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 122.14 m; B) Identificação F_084. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 122.82 m.. . . . .	55

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Caraterísticas dielétricas de materiais comuns (adaptado de Reynolds, 1997; Daniels, 2004; Cassidy, 2009a; Gonçalves, 2013) .....	15
<b>Tabela 2</b> – Antenas produzidas pela GSSI compatíveis com o sistema Sir-3000 e respetivas aplicações técnicas, profundidades de penetração e resolução esperada (adaptado de Fernandes <i>et al.</i> 2010; Dados do fabricante de 2016) .....	17
<b>Tabela 3</b> – Lista dos principais fabricantes de equipamentos de Georradar e respetivos modelos produzidos, dedicado a aplicações geológicas (dados dos fabricantes de 2016) .....	24
<b>Tabela 4</b> – Estimativa histórica dos minérios de Sn e W no eluvião da Bejanca (Lynton, 1953) .....	34
<b>Tabela 5</b> – Especificações técnicas do SIR-3000 da GSSI (dados do fabricante) .....	39
<b>Tabela 6</b> – Especificações gerais das antenas de 200 MHz e 400 MHz da GSSI (dados do fabricante) .. .....	39
<b>Tabela 7</b> – Sequência de processamento aplicada sobre os ficheiros F_040 e F_056, referentes ao perfil 1, Campo A da Área 1.. ..	48
<b>Tabela 8</b> - Cálculo do volume das áreas estudadas no decurso desta dissertação. Resultados obtidos através do <i>software</i> Surfer 11. Resultados apresentados em pés ao cubo (ft <sup>3</sup> ) e metros cúbicos (m <sup>3</sup> ) .. .....	50



## Lista de Abreviaturas

A1 – Área de estudo 1

A2 – Área de estudo 2

A3 – Área de estudo 3

AGC – Automatic Gain Control

C\_ – Campo

CMP – Common Mid-Point

CO – Common Offset

E – Este

F\_ – Ficheiro

Px<sup>1</sup>-2 - Fim

GSSI – Geophysical Survey Systems Inc.

GPS – Global Positioning System

GPR – Ground Penetrating Radar

IDS – Ingegneria dei Sistemi

Px<sup>1</sup>-1 – Início

N – Norte

O – Oeste

ft – Pé

RDP – Relative Dielectric Permittivity

Seq. – Sequência

SIR – Subsurface Interface Radar

SI – Sistema Internacional

S – Sul

Sn – Estanho

W – Volfrâmio

---

<sup>1</sup> Número do perfil



## Lista de Símbolos

$\gamma$  – Amplitude de Onda

$\theta_i$  – Ângulo de Incidência

$\theta_t$  – Ângulo de Transmissão

Tx – Antena Emissora / Transmissora

Rx – Antena Recetora

E – Campo Elétrico

H – Campo Magnético

$\lambda$  – Comprimento de Onda

$\alpha$  – Coeficiente de Atenuação (dB/m ou Np/m)

R – Coeficiente de Reflexão

T – Coeficiente de Transmissão

$\sigma$  – Condutividade Elétrica

$\sigma_w$  – Condutividade dos fluidos dos poros

$\sigma_c$  – Condutividade superficial dos sedimentos da matriz

a – Constante Empírica (0.4 - 2)

n – Constante Empírica ( $\sim 2$ )

$\mu_\epsilon$  – Energia Armazenada

m – Expoente de Cimentação

$\mu_\sigma$  – Energia Dissipada

$\omega$  – Frequência Angular

f – Frequência da Onda (Hz)

P – Fator de Perda

$1/f$  – Período da Onda

$\mu$  – Permeabilidade Magnética

$\mu_0$  – Permeabilidade Magnética no espaço livre ( $1.257 \times 10^{-6}$  H/m)

$\mu_r$  – Permeabilidade Magnética Relativa

$\epsilon$  – Permittividade Elétrica

$\epsilon_0$  – Permittividade Elétrica no espaço livre ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m)

$\epsilon_r$  – Permittividade Elétrica Relativa / Permittividade Dielétrica Relativa

r – Raio

S – Saturação Fracional

sen – seno

$C_0$  – Velocidade das ondas eletromagnéticas no vázio / Velocidade da luz no vázio

V – Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas

$V_m$  – Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações gerais

O Georradar, também designado de Ground-Penetrating Radar (GPR) tem sido utilizado em Portugal desde o início da década de 90 do século passado (Costa, 2009) e têm-se diversificado até aos dias de hoje tanto em meios académicos como em meios empresariais. Este é verdadeiramente um equipamento versátil, permitindo ao seu utilizador operá-lo em diferentes áreas do conhecimento, como por exemplo: na exploração mineira (White *et al.*, 1999; Patterson & Cook, 2002; McCuaig & Ricketts, 2004; Singh, 2007; Francke & Utsi, 2009; Manu *et al.*, 2013); na arqueologia (Matias *et al.* 1995); em geotecnia (Fullagar & Livleybrooks, 1994); em engenharia civil (Dérobert *et al.*, 2003; Evans *et al.*, 2008; Costa, 2009; Weise & Schaurich, 2003), entre muitos outros que serão mencionados no decorrer desta dissertação.

O grande potencial desta técnica de prospeção geofísica reside no facto de poder ser aplicada por um conjunto reduzido de operadores, devido em grande parte à sua portabilidade. Como é uma técnica que comporta meios relativamente ligeiros, os custos a ela associados são menos significativos que os associados a uma abordagem de investigação/prospeção mais tradicional, especialmente quando tido em conta a rapidez com que os dados podem ser adquiridos. O grande avanço tecnológico no desenvolvimento dos equipamentos de GPR e o progressivo melhoramento da capacidade dos mesmos em termos de análise, armazenamento e processamento dos dados tem revelado um interesse crescente da sua utilização em várias áreas de atuação.

Infelizmente a prospeção mineira é uma área de atuação do Georradar pouco estudada em Portugal, incidindo sobre conhecimentos pouco divulgados. Todavia, poderá ser uma ferramenta extremamente útil, ao auxiliar trabalhos prospetivos em ambientes de depósitos sedimentares (eluvionares) permitindo, se as condições forem ideais, o mapeamento do substrato e de outros refletores presentes no solo, possibilitando assim a quantificação volumétrica e da tonelagem das áreas sob investigação. As informações disponíveis sobre a utilização desta técnica a nível mineiro podem ser encontradas na literatura estrangeira, sugerindo-se a leitura dos artigos dos seguintes autores, White *et al.* (1999), Patterson & Cook (2002), McCuaig & Ricketts (2004), Singh (2007), Francke & Utsi (2009) e Manu *et al.* (2013).

Nesta literatura conseguiu-se implementar uma metodologia de trabalho adequada conforme os objetivos propostos. No âmbito do panorama nacional crê-se que este é um trabalho inovador em Portugal, tendo em conta o contexto do potencial mineiro.

## **1.2. Objetivos da dissertação**

A presente trabalho, realizado no âmbito do Mestrado em Geociências – Ramo Valorização de Recursos Geológicos, tem por objetivo a definição de uma metodologia prospetiva com recurso ao Georradar, pretendendo-se assim, criar uma estratégia prospetiva que possa vir a ser implementada previamente ou a quando da prospeção de toda a área do Eluvião da Bejanca. Este trabalho visa também estudar as potencialidades do Georradar em contexto de exploração mineira, contribuindo assim para o aumento do conhecimento nesta matéria. A opção por este tema e do caso de estudo em concreto resultou da minha experiência profissional na empresa Minéralia - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., onde participei em vários projetos ligados ao setor mineiro. O interesse na aplicação da técnica de Georradar surgiu no seguimento de uma campanha de amostragens que decorreu na zona do antigo Complexo Mineiro da Bejanca (Queirã, Viseu), sobre o estudado eluvião da Bejanca. Foi então sugerido por um consultor externo a utilização desta técnica para determinar a profundidade do substrato rochoso e assim auxiliar não só o cálculo do volume como o cálculo da tonelagem, caso um dia se volte a explorar a zona do eluvião da Bejanca. Estes dados têm grande importância, pois permitem antecipadamente ter um conhecimento da zona a explorar, contribuindo assim para a planificação dos trabalhos futuros, caso os haja, e antecipar todos os custos associados. Pretende-se, neste sentido, investigar as potencialidades da utilização do Georradar na identificação da estratigrafia do subsolo, contribuindo para a determinação da profundidade do substrato rochoso e possibilitando o cálculo de volumetrias e tonelagens de solos e sedimentos de cada área estudada.

Como linha condutora para este trabalho, serão desdobrados os seguintes objetivos:

- Definição de uma metodologia prospetiva e de aquisição de dados que se adeque ao contexto mineiro local;
- Avaliação das potencialidades do equipamento de Georradar na definição da estratigrafia dos locais estudados;
- Avaliação e comparação da eficácia das antenas de 200 e 400 MHz;
- Definição de uma metodologia de processamento;
- Cálculo da volumetria e da tonelagem de cada área estudada.

### 1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos que se encontram estruturadas da forma que se passará a expor.

No capítulo 1, designado por “Introdução”, expõe-se brevemente o tema e os objetivos propostos, assim como a estrutura da dissertação.

No capítulo 2, designado por “ O Georradar como ferramenta de prospeção” é apresentado o estado de arte relativo ao Georradar e é reunida a informação teórica que foi obtida sobre o tema. Neste capítulo serão também abordados alguns aspetos teóricos, tais como, a propagação das ondas eletromagnéticas, os fatores que conduzem à diminuição da intensidade do sinal, a descrição do equipamento do Georradar e os seus princípios de funcionamento, assim como a aquisição e processamento de dados.

O capítulo 3, intitulado “Trabalho prático desenvolvido – Caso de estudo” expõe o trabalho prático desenvolvido nas três áreas estudadas do eluvião da Bejanca. Aqui, para além do enquadramento do caso de estudo, são abordados aspetos relacionados com o equipamento e *software* utilizado, o método de trabalho adotado, a seleção das áreas de estudo, entre outros. De destacar ficam os capítulos referentes ao tratamento e interpretação de dados, à modelação 3D e cálculo de volumes e por último os resultados obtidos.

No capítulo 4, intitulado “Discussão dos resultados”, são apresentados e discutidos de forma resumida os resultados dos estudos referidos no capítulo 3.

No capítulo 5, designado de “Considerações finais” são referidas as principais conclusões desta dissertação assim como algumas recomendações e os trabalhos futuros a desenvolver.



## 2. O Georradar como ferramenta de prospeção

### 2.1. Estado da Arte

#### 2.1.1. Notas históricas

Não é intenção deste estudo apresentar a história do Georradar de forma muito detalhada mas sim construir uma breve retrospectiva, de forma breve e sucinta, das principais notas históricas.

O primeiro uso de ondas eletromagnéticas para deteção de objetos soterrados é atribuído ao alemão Christian Hülsmeier, numa patente alemã de 1904 (Daniels, 2007), contudo os primeiros trabalhos publicados sobre esta matéria foram atribuídos a Leimbach e Löwy em 1910 (Reynolds, 1997). Estes últimos autores tentaram de uma forma remota detetar a presença de objetos metálicos soterrados no solo através da utilização de um dispositivo de transmissão de ondas contínuas (Clemeña, 1991; Reynolds, 1997). Experiências adicionais foram realizadas por Hülsenbeck (1926) em meados da década de 1920, que desenvolveu a primeira aplicação da utilização de pulsos de radar para a investigação de estruturas soterradas (Reynolds, 1997).

Foi na Áustria, em 1929, que o primeiro equipamento que poderíamos designar de Georradar surgiu, tendo sido utilizado por Stern (1929) para determinar a espessura de um glaciar. Este trabalho pioneiro recebeu pouca atenção à época, porém demonstrou que as ondas eletromagnéticas podiam ser transmitidas através de outros meios (Conyers, 2004).

A década de 1930 assistiu a um grande impulso no desenvolvimento da tecnologia de emissão e receção de ondas eletromagnéticas, mostrando o seu valor para usos militares quando provou ser bastante eficaz na deteção de aviões. Isto foi possível dada a perceção de que diferentes materiais apresentam diferentes propriedades refletivas (Gonçalves, 2013).

A primeira aplicação em grande escala desta tecnologia decorreu durante a Segunda Guerra Mundial quando os Britânicos e posteriormente os Americanos utilizaram sistemas de radar arcaicos mas bastante eficazes na deteção de aviões e submarinos (Buderi, 1998; Conyers, 2004). Foi em 1934, pouco antes do despoletar desta guerra que o termo RADAR surgiu, derivando este acrónimo de “RAdio Detection And Ranging”. Este termo designa todos os equipamentos que, através das emissões das ondas de rádio, detetam objetos e determinam a distância a que se encontram (Buderi, 1996).

Foi apenas no final da década de 1950 que a comunidade científica recuperou o trabalho pioneiro de Stern (1929) e recomeçou a pesquisar novas aplicações para as ondas de RADAR. Este despertar da

comunidade científica foi motivada por um conjunto trágico de acidentes que envolveu alguns aviões da força aérea dos Estados Unidos da América que se despenharam contra glaciares na Gronelândia após erro dos operadores de radar que interpretaram de forma errada os dados que estavam a ser gerados (Conyers, 2004). As experiências realizadas no final da década de 50 mostraram que a tecnologia de RADAR podia ser utilizada para transmissão através de materiais sólidos, como rochas e solos, o que conferia a possibilidade de identificar várias interfaces sub-superficiais como a estratigrafia dos solos, o nível dos lençóis freáticos e a identificação de objetos soterrados (Gonçalves, 2013).

A designação Radar de Penetração no Solo (“Ground-Penetrating Radar” – GPR na literatura anglo-saxónica) ou mais vulgarmente conhecida, em Portugal, como Georradar, surge no final de 1960 após o desenvolvimento de novos sistemas de RADAR (Fernandes, 2006). Em 1967, a NASA (National Aeronautics and Space Administration) construiu um protótipo de um sistema de GPR que enviou numa missão não tripulada à lua (Apollo 17) de forma a estudar as propriedades elétricas e geológicas da superfície lunar (Conyers, 2004). É também na década de 60, com o desenvolvimento da técnica de “radio echo-sounding” que se verificou um aumento na utilização da técnica de Georradar para o estudo de características glaciológicas e de várias estruturas geológicas, tais como aquíferos de água doce e salina, estratigrafia de depósitos sedimentares fluviais, estrutura interna de dunas de deserto, estratigrafia de praias arenosas, entre outros (Annan & Davis 1977).

Já na década de 70 observou-se o nascimento de empresas vocacionadas ao desenvolvimento de sistemas de GPR, como é o caso da norte americana GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.), fundada em 1970. Esta empresa pioneira e atualmente líder mundial no desenvolvimento de sistemas de GPR lançou o primeiro aparelho comercial de Georradar em 1971, tendo em 1974 comercializado o primeiro equipamento portátil (GSSI). A empresa italiana IDS (Ingegneria Dei Sistemi) é também um bom exemplo do alargamento do mercado, tendo em 1980 criado um departamento dedicado a aplicações e desenvolvimento de sistemas de GPR (IDS). Destacam-se ainda as empresas suecas MALA - Geoscience e Geoscaners assim como a canadiana Sensors & Software.

O desenvolvimento da tecnologia de Georradar, nestes últimos 40 anos tem permitido um alargamento das áreas de implementação desta técnica, sendo hoje possível aplica-lo em diversas áreas de atuação como por exemplo: ferramenta de prospeção geotécnica, na localização de objetos enterrados ou cavidades como canalizações, tubagens, galerias de minas e túneis (Fullagar & Livleybrooks, 1994); na engenharia civil, em deteção de vigas de reforço e de vazios, na avaliação da integridade estrutural de construções em betão (Taffe & Maierhoffer, 2003), na delaminação de betão em coberturas (Dérobert *et*

*al.*, 2003), na avaliação de pavimentos e da espessura das camadas de betuminoso de estradas (Evans et al., 2008; Costa, 2009), na avaliação do processo de cura de betões (Weise & Schaurich, 2003) ou na avaliação de vigas de esforço em pontes de betão (Taffe & Maierhoffer, 2003), entre outros; ferramenta geológica, na definição de contatos geológicos (Baker, 1991; Bristow & Jol, 2003), para estudar a estrutura dos solos (Olson & Doolittle, 1985; Freeland *et al.*, 1998), no estudo e cartografia de seqüências sedimentares para a definição de ambientes deposicionais antigos (Bristow & Jol, 2003; Wilkins & Clement, 2007), assim como na exploração mineira, onde o Georradar é utilizado como ferramenta de prospeção de pedras preciosas (Patterson & Cook, 2002) e na delimitação de depósitos de ouro e agregados, entre outros (White *et al.*, 1999; McCuaig & Ricketts, 2004; Singh, 2007; Francke & Utsi, 2009; Manu *et al.*, 2013); na deteção de minas terrestres e munições por explodir (Daniels, 2004); nas ciências forenses, auxiliando na identificação de sepulturas, valas comuns e corpos de vítimas de assassinatos (Nobes, 1999; Billinger, 2009); ou mais recentemente, a partir da década de 90, na localização e monitorização de infiltrações de contaminantes e de plumas tóxicas no solo (Daniels, 1995; Castro & Branco, 2003), na determinação da humidade dos solos para melhoramento da capacidade produtiva de vinhas e pomares (White, 2009) e na identificação de áreas afetadas por derrames petrolíferos em áreas costeiras (Lorenzo *et al.*, 2009).

Para uma visão mais detalhada sobre este assunto sugiro a consulta do trabalho de Annan (2003), onde é possível acompanhar sucintamente a história do GPR no último século. De notar ainda é a Tese de Doutoramento de Gonçalves (2013) onde é também possível encontrar uma boa leitura sobre a história do Georradar.

### **2.1.2. A utilização do Georradar em Portugal**

De uma forma breve e sucinta será apresentado de seguida uma retrospectiva histórica da utilização do Georradar em Portugal, mencionando-se alguns dos trabalhos que se conhecem nesta área.

O Georradar dá os primeiros passos em Portugal no início da década de 1990, quando é já uma tecnologia bem consolidada a nível mundial. Os primeiros estudos efetuados com o GPR em Portugal, segundo Costa (2009), foram realizados pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) sendo a referência mais antiga a da publicação de Rodrigues (1991) e Rodrigues *et al.* (1991). Surgem ainda outras publicações, associadas ao LNEC, de trabalhos realizados pela Doutora Marília Oliveira (Rodrigues *et al.*, 1991; Sousa *et al.*, 2000; Fernandes *et al.*, 2008; Costa, 2009), particularmente na aplicação do Georradar no contexto rodoviário.

É também na década de 1990 que esta técnica começa a ser utilizada no meio académico nacional, sendo o Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro pioneiro na sua utilização, aplicando o método à arqueologia (Matias *et al.*, 1995), a questões ambientais (Matias *et al.*, 2000) e a questões ao nível dos recursos geológicos e hidrológicos (Moura & Matias, 1999). De acordo com Gonçalves (2013), só a partir da década de 2000 é que a utilização do Georradar se começa a diversificar pelo restante meio académico, estando hoje em dia presente em diversas instituições académicas nacionais, realizando investigações científicas nas mais diversas áreas das geociências, da engenharia civil e das ciências forenses, onde se incluem: o Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho (Gonçalves *et al.*, 2008); o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Fernandes, 2006); o Instituto Politécnico de Tomar (Franco *et al.*, 2012); o Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Costa, 2009); o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (Franco, 2010); o Departamento de Engenharia de Minas e Geoambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Cavalheiro & Carvalho, 2009a, 2009b); o Centro de Geofísica da Universidade de Évora (Lourenço *et al.*, 2009); o Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Ramos *et al.*, 2011); e o Gabinete de Arqueologia da Reitoria da Universidade de Coimbra (Filipe & Morgado, 2011).

Segundo Costa (2009), para além do meio académico observou-se no final da década de 1990, a utilização do GPR no meio empresarial através da prestação de serviços de prospeção em diferentes áreas de aplicação. Segundo o mesmo autor, a Geosurveys foi a empresa pioneira na utilização deste método, estando em atividade desde 1999 e especializando-se nas áreas da prospeção geofísica e geológica, tendo já uma vasta experiência com o GPR nas áreas da arqueologia, geotecnia, inspeção de estruturas de engenharia, deteção de estruturas enterradas, questões ambientais e investigação forense (Almeida *et al.*, 2006; Cruz *et al.*, 2008).

Já na primeira década de 2000 surgem empresas como a Tecnowave, sediada em Braga e em atividade desde 2006, especializada na inspeção e diagnóstico de estruturas (Cruz *et al.*, 2006; Fernandes, 2006; Fernandes *et al.*, 2008); a Sinergeo, com sede em Vila Verde e em atividade desde 2007, é uma empresa de consultadoria em áreas que abrangem a geotecnia, geologia, hidrogeologia e geofísica, tendo aplicado o Georradar nos domínios da pedologia e arqueologia (Azevedo *et al.*, 2012). Na verdade, são já várias as empresas em Portugal a exercerem atividades na área da geofísica, aplicando o método do Georradar, merecendo ainda referência as seguintes empresas: Geocontrolo (Bobadela), GeoSonda (Santa Maria da Feira), Geoárea (Linda a Velha) e Sínese (Sardoal).

O fornecimento deste tipo de serviços, segundo Costa (2009), não acaba com estas empresas, existindo a participação de profissionais liberais e de empresas, como a Dryas e a Era-Arqueologia (Gonçalves, 2013), que recorrem ao aluguer deste tipo de equipamentos com o objetivo de prestar serviços nos diversos domínios da aplicação do Georradar.

## **2.2. Fundamentos teóricos do Georradar**

Os fundamentos do método de Georradar estão assentes na teoria eletromagnética (EM), cuja história estende-se há mais de dois séculos, sendo tema de várias publicações científicas (Annan, 2003; Annan, 2009).

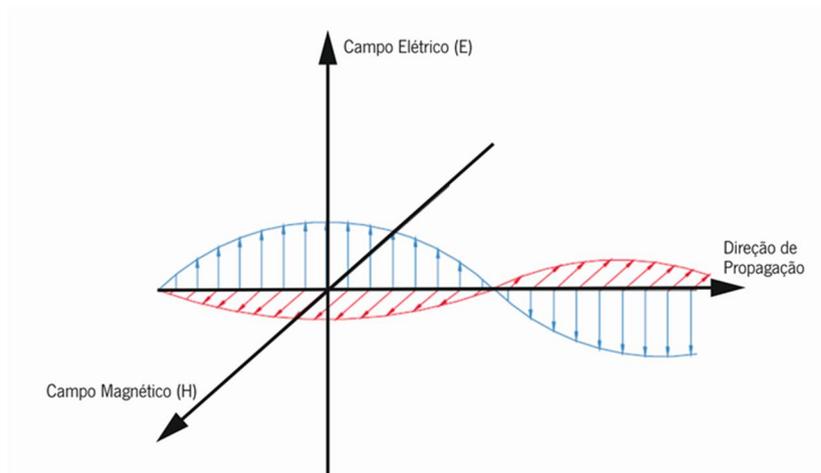
As equações de Maxwell constituem a base da teoria eletromagnética, descrevendo matematicamente a física dos campos eletromagnéticos. Contudo estas equações não fornecem nenhuma informação sobre as propriedades elétricas dos materiais, sendo necessário introduzir as relações constitutivas do meio (Alves, 2014). A combinação das duas fornece as bases para se poder descrever quantitativamente os sinais de GPR (Annan, 2003; Annan, 2009). A sua compreensão é de enorme importância tanto para uma correta utilização do equipamento como para uma correta interpretação dos dados de GPR.

De uma forma simplista, o princípio básico da metodologia de Georradar implica a geração de impulsos eletromagnéticos, a partir de uma unidade central, que são propagados em direção ao solo a partir de uma antena transmissora. Estes impulsos ou ondas são parcialmente refletidos, sendo essas reflexões dependentes do grau de heterogeneidade e das estruturas presentes no solo. O tempo que decorre entre a emissão e a receção do sinal indicará a profundidade a que se encontra a estrutura responsável pela reflexão.

As bases da teoria de Georradar serão sucintamente apresentadas de seguida, servindo apenas para uma melhor compreensão dos fundamentos deste método. Uma discussão mais aprofundada sobre o que se segue poderá ser encontrada em Reynolds (1997), Jol (2009) e Gonçalves (2013).

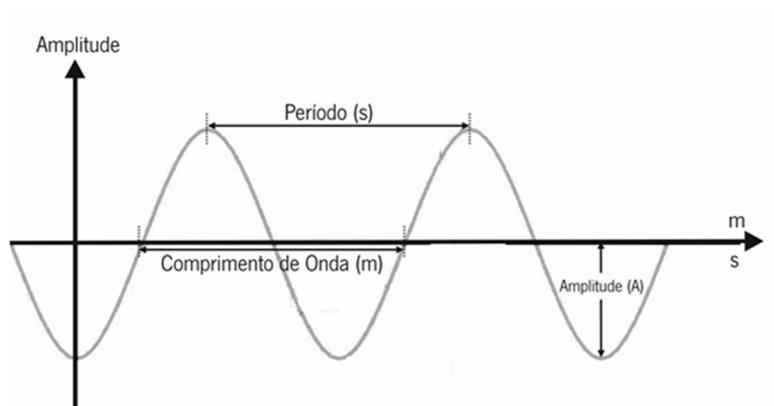
### **2.2.1. Natureza das ondas eletromagnéticas**

A natureza dos campos eletromagnéticos e os seus princípios subjacentes foram inicialmente descritos em 1864 pelo físico escocês James Clark Maxwell, através de quatro equações fundamentais conhecidas como as equações de Maxwell (Annan, 2009). Uma onda eletromagnética é constituída por duas entidades oscilantes e perpendiculares entre si, que originam uma perturbação no espaço: o campo elétrico (E) e o campo magnético (H), como se exemplifica na figura 1.



**Figura 1** – Onda eletromagnética no espaço com o campo elétrico (E) e magnético (H) polarizado (adaptado de Baker *et al.* 2007).

A radiação eletromagnética é caracterizada pelas mesmas propriedades inerentes ao movimento de qualquer onda periódica: frequência ( $f$ ); período de onda ( $1/f$ ); comprimento de onda ( $\lambda$ ) e amplitude ( $\gamma$ ), como apresentado na figura 2.

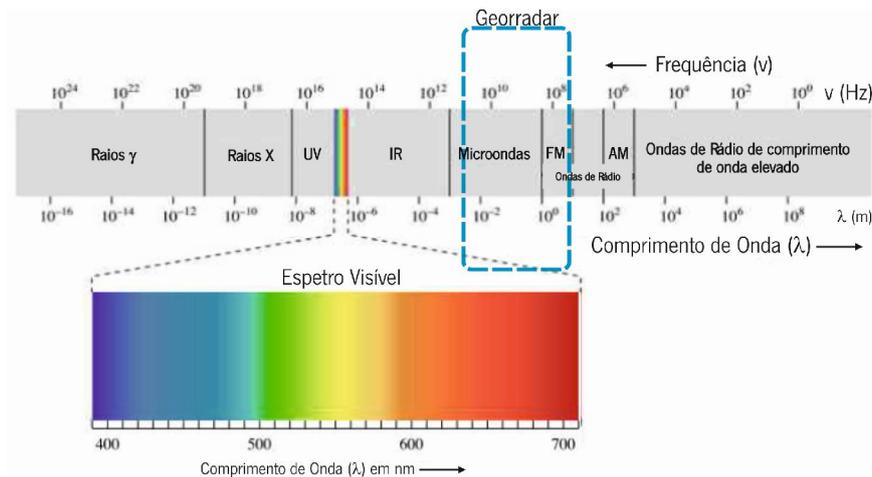


**Figura 2** – Componentes principais de uma onda eletromagnética (adaptado de Costa, 2009).

Uma particularidade inerente à natureza das ondas eletromagnéticas prende-se ao facto de se propagarem, no vácuo, à velocidade da luz ( $\approx 2.99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ), no entanto ao atravessar matéria sólida a velocidade difere da apresentada. Esta velocidade é denominada de  $v$ , e é obtida através da seguinte expressão:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

onde a constante  $\epsilon_0$  representa a permissividade do espaço livre ( $8.54 \times 10^{-12}$  F/m) e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do espaço livre ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m). F/m (Farad por metro) e H/m (Henry por metro) representam as unidades SI para medir, respetivamente, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética (Costa, 2009). Como se pode observar na figura 3, o intervalo da frequência da radiação eletromagnética é muito vasto, compreendendo frequências abaixo dos 10Hz (micro pulsações atmosféricas), até às frequências de radar ( $10^8$  até  $10^{11}$ Hz) e excedendo os  $10^{16}$ Hz (raio-X e raios gama).



**Figura 3** – Espectro eletromagnético (adaptado de Costa, 2009).

Dependendo da magnitude relativa, entre a quantidade de energia perdida (associada à condutividade), e a quantidade de energia armazenada (associada à permissividade e à permeabilidade), os campos eletromagnéticos podem disseminar-se ou propagar-se como ondas. A utilização do Georradar é viável quando as condições são tais que permitem uma propagação ondulatória dos campos eletromagnéticos. Este carácter ondulatório torna-se evidente quando as equações de Maxwell são rescritas, de modo a eliminar o campo elétrico ou o campo magnético (Annan, 2009).

Como já foi referido, o Georradar é mais eficaz em materiais com baixas perdas elétricas, nas quais a quantidade de energia dissipada ( $\mu\sigma$ ) é menor quando comparada com a quantidade de energia armazenada ( $\mu\epsilon$ ).

### 2.2.2. Propriedades eletromagnéticas dos materiais

A aplicação do método de Georradar torna-se possível devido às propriedades elétricas e magnéticas, que caracterizam um grande número de materiais, quer sejam eles naturais ou artificiais, e que permitem a propagação das ondas eletromagnéticas.

As propriedades eletromagnéticas, ou ditas dielétricas, de um meio material incluem a condutividade elétrica ( $\sigma$ ), a permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) (Reynolds, 1997; Annan, 2009; Francke e Utsi, 2009; Fernandes *et al.*, 2010), e serão sucintamente descritas de seguida. Estas propriedades compõem parâmetros fundamentais e podem influenciar a forma como as ondas de rádio se propagam, refletem e atenuam ao atravessarem diferentes materiais (Costa, 2009; Gonçalves, 2013). Poderão ser observados na tabela 1 as características dielétricas de alguns materiais.

#### 2.2.2.1. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) descreve, em termos gerais, a capacidade de um dado material em conduzir uma corrente elétrica sob a influência de um campo elétrico externo (Cassidy, 2009a) e está essencialmente dependente da composição dos materiais, da condutividade dos fluidos presentes nos poros e da porosidade do meio.

Se  $\sigma = 0$  para o solo, o Georradar seria capaz de identificar alvos e horizontes a grandes profundidades, limitado apenas pela potência da antena transmissora e a sensibilidade da antena recetora (Francke e Utsi, 2009). No entanto, um dos fatores que mais afeta a profundidade de penetração das ondas de radar no solo é a atenuação e dispersão das ondas de radar (Conyers, 2004, 2013). Este fenómeno ocorre devido à grande maioria dos solos apresentar um certo grau de condutividade elétrica.

A corrente elétrica propaga-se pelas rochas e minerais através de três modos de condução distintos: óhmico, dielétrico e eletrolítico (Ulaby, 2001). A condução óhmica requer a presença de eletrões livres, como aqueles presentes em materiais metálicos. A condução dielétrica ocorre em rochas, solos ou sedimentos altamente resistivos, e requer que os átomos polarizem ligeiramente de modo a gerar correntes de deslocamento. Por sua vez, na maioria das rochas e solos predomina a condução eletrolítica, que requer a presença de iões para o transporte da carga elétrica, tais como os encontrados dissolvidos em águas subterrâneas (Baker *et al.*, 2007).

Como demonstrado pela lei de Archie (Baker *et al.*, 2007), a condução eletrolítica depende da porosidade e da condutividade dos fluidos dos poros, como se pode verificar na seguinte fórmula,

$$\sigma = a\phi^m S^n \sigma_w + \sigma_c [S/m]$$

Onde:

m - expoente de cimentação, com valores constantes entre 1.3 a 2.5, usualmente 2 para sedimentos não consolidados;

a - constante empírica (0.4-2), usualmente 1 para sedimentos não consolidados;

S - saturação fracional do volume dos poros;

n - constante empírica ( $\sim 2$ );

$\sigma_w$  - condutividade dos fluidos dos poros (S/m);

$\sigma_c$  - condutividade superficial dos sedimentosa da matriz (S/m)

A grande maioria dos minerais constituintes das rochas e dos materiais presentes no subsolo são considerados isolantes, com exceção, quando em presença de água, das argilas e dos minerais metálicos (ex: ferro, cobre, zinco, etc.) (Aguiar, 2005). Estes minerais eletricamente condutivos impedem uma propagação adequada e dissipam rapidamente a energia de radar no solo, comprometendo a utilização do Georradar.

#### 2.2.2.2. Permittividade elétrica

A permissividade ( $\epsilon$ ) é uma propriedade elétrica que descreve a capacidade de um dado material armazenar e libertar energia eletromagnética sob a forma de cargas elétricas, relacionando-se tradicionalmente com a capacidade de armazenamento dos condensadores (Cassidy, 2009a). A permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) é usualmente apresentada sob forma da permissividade elétrica relativa ( $\epsilon_r$ ), designada também de permissividade dielétrica relativa (RDP – Relative Dielectric Permittivity), onde:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Em que  $\epsilon$  representa a permissividade de uma dado material, e  $\epsilon_0$  representa a permissividade do espaço livre ( $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m).

Assim, os materiais são geralmente caracterizados em função da sua permissividade elétrica relativa ( $\epsilon_r$ ), considerando-se dielétricos todos aqueles que permitem a propagação de um campo eletromagnético (Gonçalves, 2013). Apesar dos materiais dielétricos serem maus condutores elétricos, são eficientes na condução de campos eletrostáticos.

O valor da permissividade elétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) determina-se, normalmente, de uma forma empírica a partir de medições realizadas em campo, mas também pode ser medido em laboratório, embora as condições naturais nem sempre são facilmente replicadas (Conyers, 2004). Por conseguinte, possibilita também medir a capacidade de transmissão das ondas de radar em profundidade, permitindo assim calcular a velocidade de propagação da energia no solo assim como a sua intensidade (Daniels, 2004).

### 2.2.2.3. Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética ( $\mu$ ) resulta da rotação, e do movimento em orbitas atômicas, dos elétrons, e da consequente perda e armazenamento de energia que estes movimentos provocam (Francke e Utsi, 2009).

Na generalidade dos ambientes geológicos, os efeitos magnéticos têm uma influência reduzida, quase desprezável, sobre a propagação das ondas de radar (Olhoeft, 1998). Contudo, estes efeitos magnéticos podem ser importantes de contabilizar quando, no solo, existirem minerais ferromagnéticos (ex: ferro, cobalto, níquel, seus óxidos e sulfuretos) em percentagens superiores a 5% do seu volume (Roth *et al.*, 1990; Serway, 1996; Cassidy, 2009a). No entanto, como a quantidade destes minerais em materiais subsuperficiais é tipicamente inferior a 2% do seu volume, a sua importância é negligenciável e não contabilizada nos cálculos (Cassidy, 2009a). Consequentemente, o valor da permeabilidade magnética ( $\mu$ ) da maioria dos materiais subsuperficiais é simplificada para o valor de espaço livre  $\mu_0=1.257 \times 10^{-6}$  H/m (Cassidy, 2009a). Alternativamente, dado os baixos valores, é utilizada a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ), que pode ser determinada da seguinte forma:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Onde  $\mu_r \approx 1$  para a maioria dos materiais não magnéticos.

**Tabela 1** – Características dielétricas de materiais comuns (adaptado de Reynolds, 1997; Daniels, 2004; Cassidy, 2009a; Gonçalves, 2013).

<i>Material</i>	<i>Permitividade dielétrica relativa (<math>\epsilon_r</math>)</i>	<i>Condutividade elétrica (<math>\sigma</math>) (mS/m)</i>	<i>Velocidade de propagação (V) (cm/ns)</i>
Ar	1	0	30
Água destilada	80	0.01	3.3
Água doce	81	0.5	3.3
Água salgada	81	$3 \times 10^4$	1
Gelo	3 - 4	0.01	16
Areias secas	3 - 5	0.01	15
Areias saturadas	20 - 30	0.1 - 1.0	6
Calcário	4 - 8	0.5 - 2	12
Granito	5 - 8	0.01 - 1	13
Xistos argilosos	5 - 15	1 - 100	9
Argilas	5 - 40	2 - 1000	5 - 13
Solos arenosos secos	4 - 6	0.1 - 100	12 - 15
Solos arenosos saturados	15 - 30	10 - 100	5 - 8
Solos limosos secos	4 - 6	0.1 - 1	7 - 9
Solos limosos saturados	10 - 20	10 - 100	5 - 8
Solos argilosos secos	4 - 6	0.1 - 10	12 - 15
Solos argilosos saturados	10 - 15	10 - 1000	8 - 9
Betão	5 - 8	0.01 - 2	15

### 2.2.3. Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas propagam-se no ar e no vácuo à velocidade da luz (aproximadamente 30 cm/ns). Contudo, quando a propagação destas ondas ocorre através de materiais sólidos ou líquidos, a velocidade ( $v$ ) de propagação é consideravelmente inferior à velocidade de propagação no vácuo (Neal, 2004), sendo expressa pela equação:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{2}\right) [(1 + P^2)] + 1}}$$

Onde  $P$  corresponde ao fator de perda ( $P = \sigma/\omega\epsilon$ ),  $\omega$  à frequência angular e  $\epsilon$  à permitividade elétrica.

No entanto, esta equação pode ser simplificada quando na presença de materiais onde se verifica uma reduzida perda de energia (low-loss) das ondas propagantes, tais como materiais rochosos e a maioria dos solos quando secos. Assim, em materiais não magnéticos a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) é igual a 1, enquanto a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) do material é bastante baixa ou próxima de zero (Neal, 2004), e o fator de perda ( $P$ ) é considerado nulo (Fernandes, 2006).

Logo, nestes materiais a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas pode ser obtida através da seguinte expressão, adaptada de Luís (2005):

$$v_m = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

#### 2.2.4. Profundidade de penetração

Como se depreende, a profundidade de penetração das ondas de radar no solo é um dos fatores mais importantes para a detecção e identificação dos alvos pretendidos, podendo ditar o sucesso ou insucesso de uma campanha prospectiva.

A profundidade de penetração do sinal de radar (tabela 2) está dependente da escolha da frequência da antena e do comprimento de onda do sinal; do objetivo do estudo; das características do local (por vezes difíceis de antecipar à inspeção); das características dielétricas dos materiais; da profundidade a alcançar e da resolução pretendida; assim como o grau de atenuação do sinal (Singh, 2007; Francke e Utsi, 2009).

A escolha da frequência da antena resultará sempre de um compromisso entre a profundidade de investigação e da resolução necessária (Cruz *et al.*, 2006), uma vez que o valor da frequência com que é emitido o sinal é inversamente proporcional à profundidade que este pode penetrar no solo. Logo, a utilização de antenas com frequências mais baixas (ex: 100 MHz) permite aumentar a profundidade de penetração do sinal no solo, com a desvantagem de diminuir a resolução do sinal, enquanto o sinal gerado por antenas de frequências mais altas (ex: 1000 MHz) atinge profundidades mais baixas, mas certificam um aumento da resolução do sinal (McCuaig e Ricketts, 2004; Leucci, 2012; Pîrnău *et al.*, 2014).

As propriedades dielétricas dos materiais, naturais ou artificiais, provocam uma atenuação significativa no sinal de radar, que aumenta exponencialmente com a profundidade, sendo por isso um fator determinante na profundidade de penetração das ondas de radar. De entre as propriedades dielétricas, é a condutividade elétrica a que mais influencia esta atenuação, uma vez que os materiais mais condutivos são os que mais contribuem para a dispersão e atenuação da componente elétrica da onda eletromagnética (Francke e Utsi, 2009; Gonçalves, 2013).

Por último, são as características físicas dos materiais a prospectar que poderão condicionar a profundidade de penetração das ondas de radar. Na generalidade dos materiais, a energia do sinal também sofre atenuação por perdas relacionadas com a dispersão das ondas, associadas à

heterogeneidade do meio, das variações granulométricas, assim como da geometria das interfaces ou de outros refletores (Gonçalves, 2013).

A tabela 2 ilustra a profundidade de penetração expectável para diferentes frequências e diferentes aplicações, em condições favoráveis.

**Tabela 2** – Antenas produzidas pela GSSI compatíveis com o sistema Sir-3000 e respetivas aplicações técnicas, profundidades de penetração e resolução esperada (adaptado de Fernandes *et al.* 2010; Dados do fabricante de 2016<sup>2</sup>).

<i>Área de aplicação</i>	<i>Frequência Central (MHz)</i>	<i>Profundidade de Penetração (m)</i>	<i>Resolução</i>
<b>Antenas acopladas ao solo (Ground-Coupled Antennas)</b>			
Inspeção de estruturas de betão e alvenaria	2600	0.4	Muito Alta
Inspeção de estruturas de betão e alvenaria	1600	0.5	Muito Alta
Inspeção de estruturas de betão e alvenaria	1000	0.6	Alta
Arqueologia; inspeção de betão; deteção de vazios	900	0 - 1	Alta
Arqueologia; ambiente; deteção de serviços (tubos de água, gás, etc.)	400	0 - 4	Média a Alta
Arqueologia; geotecnia; ambiente; deteção de serviços	270	0 - 6	Baixa a Média
Arqueologia; geotecnia; ambiente; deteção de serviços	200	0 - 9	Baixa a Média
Geologia; arqueologia; geotecnia mineira; ambiente;	100	2 - 15	Baixa
Geologia; geotecnia mineira; ambiente;	16 - 80	10 - 50	Baixa

### 2.2.5. Resolução

A resolução de uma dada antena define a feição mínima que poderá ser detetada com sucesso e em geral depende essencialmente da frequência central da antena. A resolução do sinal indica-nos a precisão com que um dado alvo pode ser localizado, assim como os seus atributos geométricos (ex: forma, tamanho, espessura) (Annan, 2003). A resolução do sinal de Georradar pode ser dividida em dois componentes, um longitudinal e outro lateral.

A resolução vertical, ou longitudinal corresponde a uma medida da capacidade de diferenciação de dois sinais adjacentes entre si no tempo. De uma forma simplista, a resolução vertical depende da frequência. As antenas de radar são concebidas de modo a operar ao longo de uma gama de frequências (comprimento de onda), onde a potência de pico ocorre na frequência central da antena (Topczewski,

<sup>2</sup> GSSI – <http://www.geophysical.com/antennas.htm>

2007). A resolução vertical máxima é dada como  $0.5 \times \lambda$  (Padaratz e Forde, 1995), onde  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda, contudo, segundo autores como Forde (2004) é possível uma resolução de um dado objeto se a sua dimensão for maior que  $0.25 \times \lambda$  ( $1/4 \lambda$ ) da radiação incidente. Importa referir que objetos com menores dimensões poderão ser detetados, todavia nada poderá ser dito quanto a sua dimensão.

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) pode ser obtido a partir da seguinte equação:

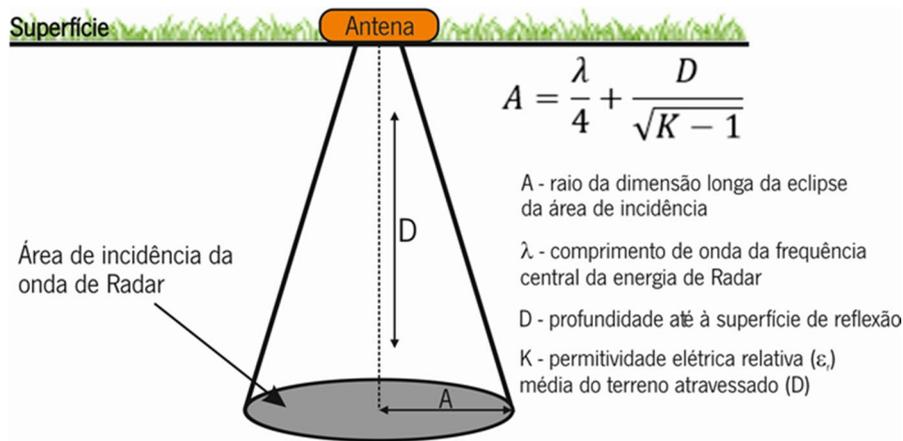
$$\lambda = \frac{V}{f}$$

Onde  $V$  é a velocidade de propagação das ondas de radar, e  $f$  a frequência do sinal.

Todavia, é necessário ter em conta que ao atravessar o solo, a energia de radar vai sofrer uma diminuição da frequência e um subsequente aumento do comprimento de onda propagante (Bristow e Jol, 2003), o que influenciará a resolução do sinal. As características dielétricas dos materiais atravessados pelas ondas de radar vão também provocar modificações na velocidade das ondas (Gonçalves, 2013).

A resolução horizontal, ou lateral descreve a capacidade de detetar e distinguir as variações laterais dos refletores, tais como as causadas pela mudança de fácies, assim como distinguir dois objetos localizados a profundidades idênticas (Leucci, 2012; Gonçalves, 2013). Segundo Daniels (2004), a resolução horizontal é inversamente proporcional a  $\sqrt{\alpha}$ , sendo  $\alpha$  o coeficiente de atenuação, podendo ser determinada pelo fenómeno de difração observado durante a reflexão do sinal. Por conseguinte, esta resolução dependerá da profundidade do refletor, da frequência central, da abertura das antenas e do comprimento de onda durante o trajeto percorrido. Sob condições favoráveis uma resolução horizontal de 1 cm pode ser alcançada (Topczewski, 2007).

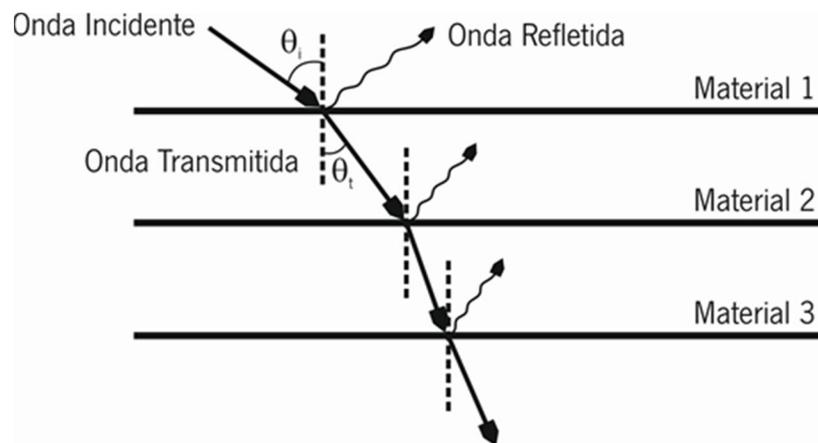
A determinação da área de incidência da onda de radar (*radar wave footprint*) sobre um dado objeto é também importante para uma boa resolução horizontal, e está estreitamente relacionada com o conceito da zona de Fresnel (Annan, 2003; Annan, 2009), onde a energia de radar é dispersada sob forma cónica pelo solo (figura 4). Assim sendo, um alvo para ser detetado deverá ter uma área igual ou ligeiramente inferior à área de incidência da energia de radar (Gonçalves, 2013).



**Figura 4** – Dispersão cônica da energia de Radar no solo. A área de incidência da radiação eletromagnética no solo pode ser estimada a partir da frequência da antena e da permissividade relativa média do solo percolado (adaptado de Conyers, 2004 e Gonçalves, 2013).

### 2.2.6. Coeficiente de reflexão e transmissão

A propagação das ondas eletromagnéticas, emitidas através de um dado meio, é condicionada pelas propriedades exibidas pelos materiais, assim como por aspetos relacionados com a geometria e configuração das estruturas atravessadas (Costa, 2009). Isto ocorre sempre que a energia de radar atravessa uma interface entre dois materiais com diferentes propriedades físicas e/ou químicas, alterando a velocidade das ondas, e conseqüentemente a energia incidente será parcialmente refletida, refratada e transmitida (Conyers, 2004; Gonçalves, 2013). A figura 5 ilustra bem este processo.



**Figura 5** – Representação da reflexão e transmissão das ondas eletromagnéticas, para um meio com múltiplas interfaces, de acordo com a Lei de Snell (adaptado de Fernandes, 2006 e Costa, 2009).

A explicação teórica sobre estes processos está assente nas leis da ótica (Costa, 2009), onde os ângulos de incidência e transmissão são definidos pela lei de Snell, expressa pela seguinte equação, quando considerada a velocidade das ondas de radar,

$$\omega_2 \text{sen} \theta_i = \omega_1 \text{sen} \theta_t$$

ou pela equação seguinte, quando considerada a permitividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) de cada um dos materiais,

$$\sqrt{\epsilon_{r1}} \text{sen} \theta_i = \sqrt{\epsilon_{r2}} \text{sen} \theta_t$$

A proporção de energia refletida é dada pelo valor do coeficiente de amplitude de reflexão ( $R$ ), que pode ser determinado através do contraste entre os valores da permitividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) dos materiais confinantes, ou através da razão entre a intensidade da energia refletida e a energia incidente. A amplitude de reflexão ( $R$ ) é uma medida adimensional, cujos valores variam entre -1 e 1, e são dados através da seguinte expressão (Daniels, 2007):

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}}$$

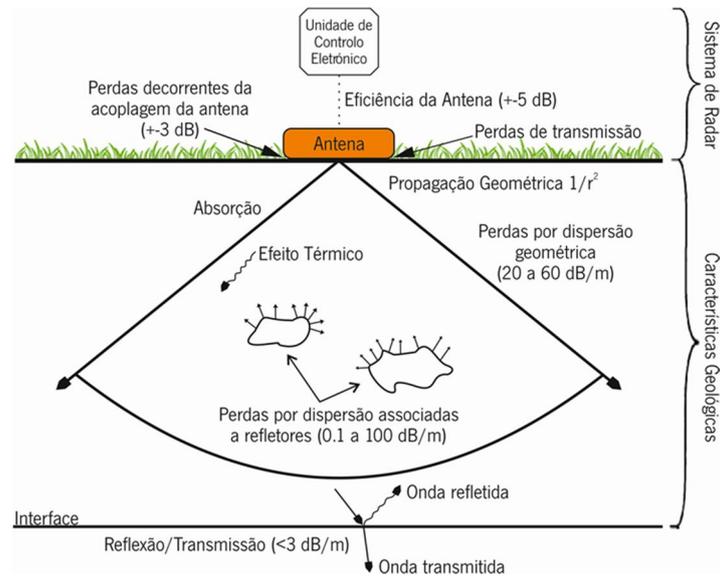
Por outro lado, o coeficiente de transmissão ( $T$ ), que caracteriza a energia refratada pela interface e transmitida através das camadas subjacentes pode ser derivada a partir do coeficiente de reflexão ( $R$ ) através de  $R + T = 1$ , pressupondo a hipótese de que não ocorrem perdas significativas do sinal. O coeficiente de transmissão ( $T$ ) pode assim ser calculado através da seguinte expressão (Clemeña, 1991; McCavitt e Forde, 1993):

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}}$$

Onde  $\epsilon_{r1}$  e  $\epsilon_{r2}$  correspondem respetivamente ao valor da permitividade dielétrica relativa das camadas 1 e 2, e considerando que a camada 2 é mais profunda que a camada 1.

### 2.2.7. Perda e atenuação da energia de Radar

As ondas eletromagnéticas são transmitidas através de meios heterogêneos, do ponto de vista das suas propriedades elétricas e magnéticas (Annan, 2009), sendo que diversos fatores contribuem para a diminuição da força do sinal e da sua consequente atenuação (figura 6).



**Figura 6** – Fatores que contribuem com a atenuação do sinal de radar (adaptado de Reynolds, 1997).

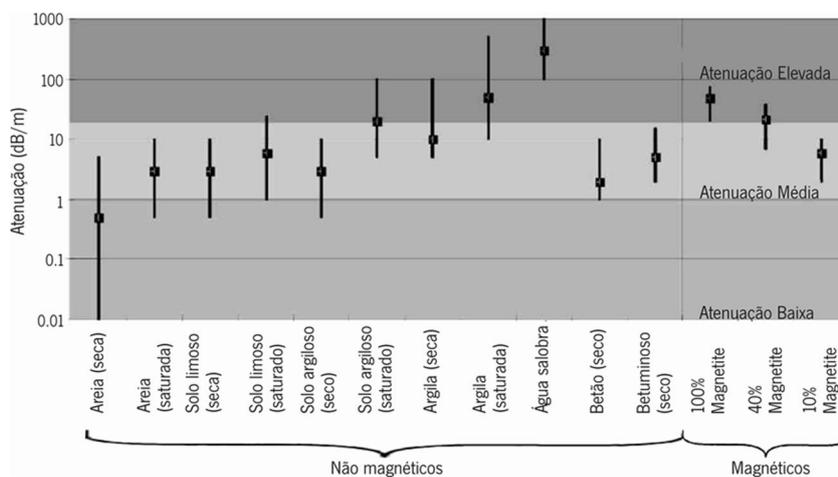
A absorção é um dos mecanismos mais significativos na contribuição para a atenuação do sinal, provocando a conversão de energia eletromagnética em energia térmica (Clark *et al.*, 2004). Este fenómeno verifica-se em materiais condutores ou em materiais em que um dos componentes tem uma condutividade elétrica mais elevada (Fernandes, 2006).

A atenuação da energia do sinal de radar também dependerá da natureza dos materiais atravessados, sendo uma função complexa das propriedades elétricas e magnéticas do meio através do qual essa energia se propaga. Contudo nem todos os materiais atenuam a energia eletromagnética da mesma forma, como se exemplifica na figura 7. O coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) é geralmente expresso em décibéis por metro (dB/m) ou em nepers por metro (Np/m), e depende da condutividade elétrica ( $\sigma$ ), da permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e da permitividade ( $\epsilon$ ) do material sob investigação, através do qual as ondas de radar se propagam.

O coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon}{2} \left( \left( 1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right)}$$

A equação apresentada acima é válida para materiais não magnéticos em que  $\mu_r = 1$ , onde  $\mu_0$  corresponde à permeabilidade magnética do espaço livre e  $\omega$  à frequência angular ( $\omega = 2\pi f$ ). Como se pode verificar, a atenuação ( $\alpha$ ) também depende da frequência do sinal, verificando-se nestes casos uma maior atenuação do sinal quando se utilizam sistemas de Georradar com sinais de elevada frequência (Costa, 2009).



**Figura 7** – Valores de atenuação (em dB/m) do sinal de Radar para diferentes materiais, ao longo de uma gama de frequências entre os 200 MHz e os 1200 MHz (adaptado de Cassidy, 2009a).

A energia eletromagnética pode ainda sofrer atenuação por dispersão geométrica do sinal de radar emitido. Este sinal é transmitido como um feixe de forma cônica com um ângulo de 30° a 45° (figura 4). À medida que o sinal se vai afastando da fonte, espalha-se por uma área maior, provocando uma redução da densidade da energia. Esta redução aumenta a uma taxa de  $1/r^2$ , sendo  $r$  a distância percorrida pelo sinal e correspondente ao raio da radiação assumindo um padrão esférico. Porém em medições superficiais esta atenuação apresenta um valor desprezável (Aguiar, 2005; Costa, 2009).

Outro fator a ter em conta na atenuação da energia de radar é a dispersão. Esta ocorre quando as ondas eletromagnéticas incidem sobre objetos com dimensões da ordem do seu comprimento de onda ou dimensões inferiores, provocando a dispersão da energia eletromagnética ou a sua difusão num padrão aleatório (Annan, 2003; Aguiar, 2005). Adicionalmente, quando as ondas eletromagnéticas incidem sobre uma interface entre dois materiais adjacentes com propriedades elétricas e magnéticas distintas, parte da energia é refletida e outra é refratada, resultando em perdas de energia (Cassidy, 2009a).

Por último, a atenuação e perda de energia pode também estar associada com a eficiência do Georradar e do bom funcionamento de todos os seus componentes eletrónicos (ex: antenas, unidades de controlo, cabos, baterias, etc), assim como da acoplagem da antena ao solo. A melhor maneira de evitar perdas durante a geração e emissão do sinal, é a utilização dos componentes eletrónicos segundo as especificações dadas pelo fabricante, que podem ser encontrados no manual do equipamento de Georradar. Por sua vez, o incorreto acoplamento da antena ao solo, também fará com que parte da energia emitida não seja transmitida, resultando na perda aérea do sinal (Gonçalves, 2013). Isto ocorre mais frequentemente em terrenos mais agrestes, onde se verificam bastantes desníveis e irregularidades no solo, e vegetação mais alta.

### **2.3. Descrição e princípio de funcionamento do Georradar (GPR)**

O Georradar é uma técnica não destrutiva baseada na propagação de radiação eletromagnética, através de meios naturais ou meios artificiais fabricados pelo Homem, com o objetivo de detetar estruturas ou objetos, subsuperficiais ou subterrâneas, com diferentes propriedades dielétricas.

O sucesso e a eficácia demonstrados por esta técnica devem-se essencialmente à rapidez de aquisição dos dados, aos relativos baixos custos de operação, quando comparado com outras técnicas e ao facto de permitir trabalhar em diferentes áreas de investigação, tais como, geotecnia, geologia, engenharia civil, entre outros (Cruz *et al.*, 2006).

#### **2.3.1. Equipamento Georradar**

Os sistemas de Georradar produzidos hoje em dia, são equipamentos concebidos para serem utilizados em diversas áreas de investigação. Um sistema moderno de GPR é constituído por quatro componentes fundamentais: unidade de controlo, antenas (emissora (Tx) e recetora (Rx)), unidade de visualização e unidade de armazenamento de dados, como ilustrado na figura 8.

A unidade de controlo é um dispositivo eletrónico composto por um microprocessador e memória para o armazenamento da configuração e das definições de cálculo, assim como para o armazenamento dos dados de campo. O principal propósito da unidade de controlo é gerar sinais eletromagnéticos de curto período e elevada voltagem, e transmiti-los à antena emissora, que por sua vez emite a radiação sobre a superfície a investigar (Topczewski, 2007). As antenas que emitem a radiação eletromagnética, também registam as reflexões e transformam-nas em informação digital, que é conseqüentemente armazenada em dispositivos próprios para posterior processamento (Fernandes *et al.*, 2010). As antenas de Georradar são equipamentos eletrónicos complexos, e provavelmente o elemento mais importante do sistema,

estando projetados especificamente para otimizar a interação com o terreno (Costa, 2009). São caracterizados pela sua frequência central ( $f$ ), situada tipicamente num intervalo de frequências entre os 10 e os 2000 MHz (Fernandes e Lourenço, 2007). A escolha de uma determinada frequência está inteiramente dependente do meio, do tipo de aplicação, da profundidade e dos alvos do estudo.

Diferentes configurações destes componentes podem ser adquiridos. Na tabela 3 é apresentada uma lista dos principais fabricantes e dos equipamentos mais adequados em aplicações de contexto mineiro e exploração mineral.

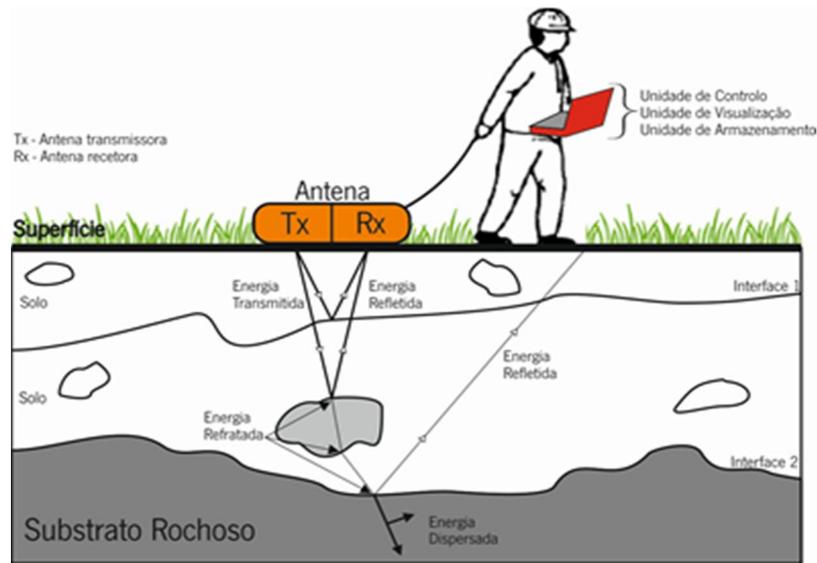
**Tabela 3** – Lista dos principais fabricantes de equipamentos de Georradar e respetivos modelos produzidos, dedicado a aplicações geológicas (dados dos fabricantes de 2016).

<i>Fabricante</i>	<i>Modelos</i>	<i>Localização e URL</i>
GSSI	Sir-20 Sir-30 Sir-3000 Sir-4000	North Salem, New Hampshire, EUA. <a href="http://www.geophysical.com">www.geophysical.com</a>
IDS	RIS-One RIS-Plus Stream X	Pisa, Itália. <a href="http://www.idscompany.com">www.idscompany.com</a>
MALÅ Geoscience	ProEx X3M RTA	Malå, Suécia. <a href="http://www.malags.com">www.malags.com</a>
Sensors & Software	Pulse Ekko PRO Noggin	Mississauga, Ontário, Canadá. <a href="http://www.sensoft.ca">www.sensoft.ca</a>
Geoscaners	Geo-60 Geo-80	Kanslihusvägen, Boden, Suécia <a href="http://www.geoscaners.com">www.geoscaners.com</a>

### 2.3.2. Modo de funcionamento

O funcionamento básico do Georradar, como observado na figura 8, reside na emissão de impulsos eletromagnéticos através de uma antena emissora, que ao propagarem-se através de um meio, vão encontrar estruturas ou interfaces entre materiais/objetos com propriedades dielétricas distintas. Estes impulsos ou ondas vão então sofrer fenómenos de refração, difração e reflexão (Fernandes, 2006; Banks e Johnson, 2011), sendo estas últimas detetadas e registadas pela antena recetora, obtendo-se assim um registo contínuo de sinais ao longo de um perfil (Fernandes *et al.*, 2010).

Os resultados podem ser visualizados durante a sua aquisição e são exibidos sob forma de radargramas, que compõem imagens gráficas bidimensionais de tempo versus distância (Cruz *et al.*, 2006). No entanto, para uma correta interpretação dos mesmos é necessário efetuar o processamento dos radargramas através da utilização de software específico, eliminando o mais possível o ruído e evidenciando as reflexões de interesse (Aguiar, 2005).



**Figura 8** – Descrição dos componentes e modo de operação de um sistema de Georradar acoplado ao terreno (adaptado de Reynolds, 1997; Knödel *et al.*, 2007; Fernandes *et al.* 2010).

## 2.4. Métodos de aquisição de dados

Segundo Davis e Annan (1989) os dados de Georradar podem ser adquiridos em modo contínuo ou deslocando repetidamente as antenas (*step mode*), segundo uma geometria específica, ao longo de um perfil. O modo de aquisição mais utilizado é o contínuo, todavia uma das desvantagens associadas a este modo resulta do mau acoplamento entre a antena e o solo em terrenos acidentados, e em particular na presença de vegetação alta (Woodward *et al.*, 2003), resultando na perda e degradação dos dados. Este modo é mais adequado quando é necessário fazer o reconhecimento do terreno (Jol e Bristow, 2003). Por outro lado, segundo Jol e Bristow (2003), o *step mode* é preferencialmente utilizado em levantamentos onde são necessários uma alta resolução e uma boa qualidade dos dados.

Dependendo da finalidade do estudo, os dados de GPR podem ser adquiridos essencialmente através de três métodos distintos. Os mais vulgarmente utilizados são: reflexão ou *Common-Offset* (CO); ponto médio comum ou *Common Mid-Point* (CMP) e tomografia.

### 2.4.1. Reflexão

Dos métodos mencionados, o mais utilizado é o de reflexão, uma vez que permite adquirir de forma rápida e simples uma grande quantidade de dados e analisar extensas áreas num curto espaço de tempo (Fernandes e Lourenço, 2007; Fernandes *et al.* 2010). Uma particularidade deste método é que a antena emissora (Tx) e recetora (Rx) são mantidos e deslocados a uma distância fixa ao longo de um perfil, como demonstrado na figura 9.

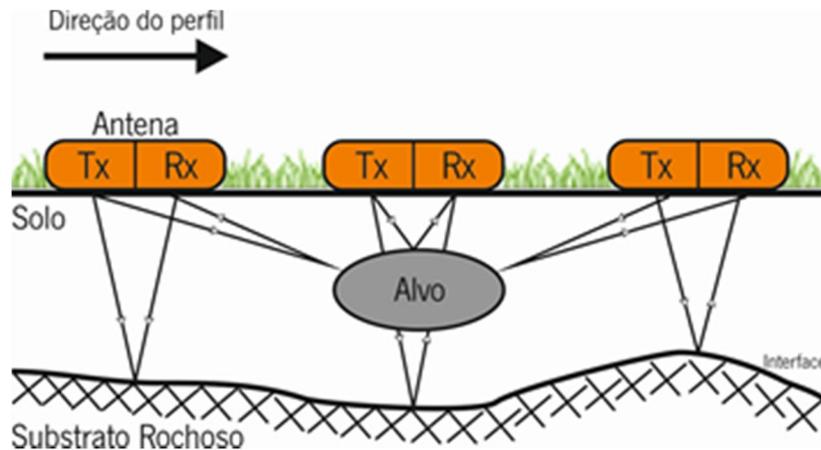
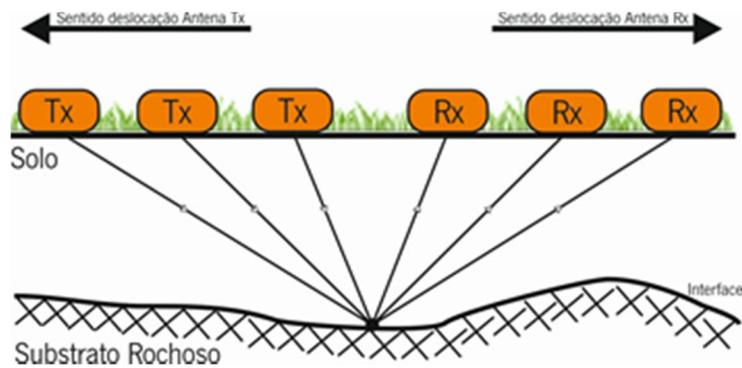


Figura 9 – Aquisição de dados no terreno através do método de reflexão (adaptado de Milsom, 2003).

### 2.4.2. Ponto médio comum (CMP)

No método do ponto médio comum ou *Common Mid-Point* (CMP) as antenas emissora (Tx) e recetora (Rx) são afastadas simultaneamente em sentidos opostos, na mesma direção do perfil, em relação a um ponto central comum (Milsom, 2003; Nascimento, 2009; Alves, 2014), como observado na figura 10. Este modo de aquisição é utilizado principalmente para estimar como a velocidade de propagação do sinal varia com a profundidade. A vantagem de realizar o CMP está na maior precisão da análise da velocidade, contudo é uma técnica bastante morosa e para ser realizada necessita de um equipamento multicanal (ex: SIR-3000 é um sistema monocanal), sendo conseqüentemente pouco utilizado em levantamentos de GPR (Milsom, 2003; Alves, 2014).

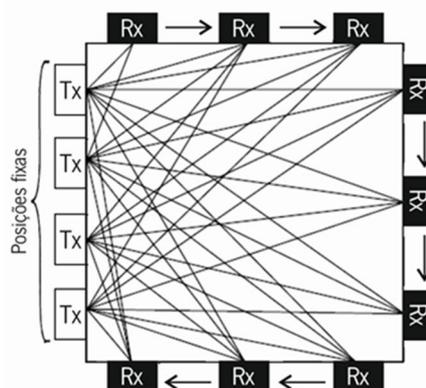


**Figura 10** – Aquisição de dados no terreno através do método de ponto médio comum (CMP). (adaptado de Milsom, 2003).

### 2.4.3. Tomografia

No modo de aquisição de dados por tomografia, as antenas emissora (Tx) e recetora (Rx) são separadas e colocadas sucessivamente em diferentes posições, de modo a cobrir por inteiro a área sob investigação (Fernandes e Lourenço, 2007; Topczewski, 2007), como demonstrado na figura 11. As aplicações desta técnica têm-se mostrado particularmente úteis na engenharia civil, uma vez que permite mapear as estruturas internas de colunas, paredes e outros elementos que possam ser alcançados por dois ou mais lados.

Este método normalmente só é utilizado para a resolução de problemas particularmente complexos, uma vez que é bastante moroso no processo de aquisição de dados e requer bons recursos computacionais (Topczewski *et al.*, 2007).



**Figura 11** – Aquisição de dados no terreno através do método de tomografia. A antena transmissora (Tx) é mantida em posições fixas, enquanto a antena recetora (Rx) é deslocada sobre a área a investigar (adaptado de Fernandes e Lourenço, 2007).

## 2.5. Processamento dos dados

No decorrer de uma campanha de prospeção e aquisição de dados de GPR, são frequentemente registadas perturbações no sinal de radar que podem influenciar a correta interpretação dos dados, podendo mesmo impossibilitar a interpretação dos mesmos. Estas perturbações podem estar relacionadas tanto com fatores externos como sinais de rádio, linhas de alta tensão ou antenas de telecomunicações, como à natureza do terreno, obstáculos ou reflexões anómalas, mas podem igualmente dever-se a problemas relacionados com o equipamento (hardware) ou o software de aquisição de dados (Gonçalves, 2013; Milsom, 2003).

Uma das grandes vantagens na utilização do método de Georradar é o facto dos dados serem adquiridos de uma maneira que permite, através de um ecrã, uma visualização rápida e em tempo real. Por vezes, para uma interpretação inicial é necessário muito pouco processamento, focando-se essencialmente na boa visualização dos dados. Contudo dependendo na aplicação e objetivo do estudo, pode ser necessário realizar um processamento mais avançado (Leucci, 2012).

O principal objetivo, inerente ao processamento dos dados de GPR é a partir da aplicação de filtros específicos, alcançar uma boa interpretabilidade dos radargramas, sendo isto possível realçando-se os desejados sinais mais fracos à custa dos não desejados, ou seja, ao ruído (Adepelumi *et al.*, 2013) e assim melhorar a relação entre sinal-ruído (Reynolds, 1997). O resultado final é um radargrama com uma secção transversal das propriedades eletromagnéticas do subsolo apresentado em termos do seu tempo de viagem (Leucci, 2012; Woodward *et al.*, 2003)

Os filtros descritos abaixo foram os utilizados para o processamento dos dados obtidos no decurso dos trabalhos de campo, contudo a ordem pela qual aqui se apresentam não corresponde à sequência utilizada durante o tratamento dos mesmos. Uma descrição mais pormenorizada e aprofundada sobre estes e outros filtros pode ser encontrada em Annan (2003), Daniels (2004) e Cassidy (2009b).

### 2.5.1. Pré-processamento

Uma vez concretizada a aquisição dos dados, o primeiro passo do processamento passa por editá-los. Nesta primeira fase o objetivo geral é obter uma ideia da qualidade dos dados. É muitas vezes a etapa mais demorada, uma vez que os ficheiros necessitam de ser reordenados e reorganizados, e se necessário corrigir erros do cabeçalho, acrescentar informações sobre a topografia do terreno ou retirar algum radargrama de má qualidade (Annan, 2003; Melo, 2007). Apesar da trivialidade desta etapa, a

boa manutenção dos dados é essencial para uma boa interpretação, particularmente no caso de haver grandes quantidades de dados (Cassidy, 2009b).

A não realização desta etapa pode resultar, por exemplo, na incorreta importação dos dados para o programa de processamento, comprometendo desta forma a interpretação dos mesmos.

### **2.5.2. Move starttime**

Segundo Sandmeier (2014) este filtro atua independentemente sobre cada traço, facilitando uma correção do tempo de início de cada perfil segundo um valor dado em nanosegundos. Torna-se num filtro bastante útil uma vez que permite eliminar a banda da primeira onda a chegar à antena recetora, a onda da reflexão da interface ar/solo (Leucci, 2012), e colocar todo o perfil sobre o mesmo plano.

### **2.5.3. Filtros de frequência**

De acordo com Cassidy (2009b), os filtros de frequência são geralmente aplicados para remover o ruído provocado pela atividade humana ou do próprio sistema, e melhorar o aspeto visual dos dados. Embora os dados de GPR sejam adquiridos num intervalo de frequência específico, as reflexões registadas incluem interferências e ruído de fundo registadas em domínios de frequência diferentes (Leucci, 2012). É este fenómeno que permite remover o ruído da informação válida contida nos dados.

A correta compreensão e utilização destes filtros é vital, uma vez que é necessário evitar a perda de informação essencial para a boa análise dos dados.

Existe uma grande variedade de filtros que podem ser aplicados, contudo o utilizado no decurso do processamento dos dados foi o filtro *band-pass*. Este resulta da combinação de outros dois filtros, o *high-pass* e *low-pass*, e permite a passagem de frequências dentro de um determinado intervalo, eliminando as frequências que se encontram fora desse intervalo (Leucci, 2012).

### **2.5.4. Dewow (subtract-mean) e *Subtract-DC-shift***

Um aspeto único dos dados de GPR surge da proximidade existente entre a antena recetora e a emissora. Os campos que envolvem a antena transmissora contêm energia de baixa frequência associada aos campos eletrostáticos e indutivos, que decaem rapidamente com a distância (Annan, 2003; Annan, 2009). Este ruído de baixa frequência, designado de *wow*, é o resultado da saturação do sinal da antena recetora (Fisher *et al.*, 1992; Neal, 2004).

Este efeito *wow* pode ser suprimido ao ser aplicado, no sinal detetado, um filtro temporal de subtração de média, designado de *dewow*, que atua individualmente em cada traço de dados. Este processo elimina os ruídos de baixa frequência, assim como as frequências indesejadas (Cassidy, 2009b; Franco, 2010). Foi ainda utilizado o filtro denominado de *Subtract-DC-shift* para possibilitar a remoção da componente inicial do sinal designado de “DC” ou “DC bias” (Cassidy, 2009b; Sandmeier, 2014)

### **2.5.5. Ganhos – AGC (Automatic Gain Control)**

A aplicação de ganhos nos dados de Georradar ocorre de forma a amplificar certas secções dos radargramas, afetados pela atenuação de sinal e/ou perdas de energia, tornando-as mais facilmente observáveis. Contudo, para além de aumentarem a amplitude dos sinais de interesse, aumentam também a amplitude dos sinais de ruído (Cassidy 2009b; Robinson *et al.*, 2013).

Esta amplificação do sinal ocorre através da introdução manual dos valores dos ganhos ou através da multiplicação dos valores das amplitudes, segundo algoritmos específicos, das ondas eletromagnéticas (Gonçalves, 2013).

Existem vários tipos de ganho, todavia o utilizado no processamento dos dados foi o *AGC* – Automatic Gain Control. O *AGC* permite ajustar, entre limites definidos pelo utilizador, o ganho de cada traço de forma uniforme, uniformizando as amplitudes ao longo do perfil e regulando o ganho em toda a profundidade (Jol e Bristow, 2003; Cassidy, 2009b; Leucci, 2012).

### **2.5.6. Background removal**

Este filtro funciona de uma forma semelhante à descrita no ponto 2.5.4., calculando através de um processo aritmético a média de todos os traços de uma dada secção e subtraindo-a a cada traço individual (Leucci, 2012). A sua utilização remove o ruído de fundo registado nos radargramas, assim como o efeito das reverberações das antenas, contudo deverão ser tomados alguns cuidados ao utilizar este filtro uma vez que pode remover reflexões lineares horizontais importantes para a análise (Gonçalves, 2013).

### **2.5.7. Análise da velocidade e conversão em profundidade**

Até agora, as etapas de processamento descritas anteriormente têm operado apenas no domínio do tempo, não estando os dados ainda relacionados diretamente com a profundidade. Assim sendo, e com a finalidade de converter os radargramas em uma escala de profundidade, o que é necessário para uma interpretação realista dos dados e também para a aplicação de correções topográficas, uma estimativa precisa da velocidade média do subsolo deve ser obtida (Cassidy, 2009b). A determinação da velocidade

das ondas pode ser obtida através das metodologias de CMP (*Common Mid-Point*) e/ou de ajuste de hipérbolas.

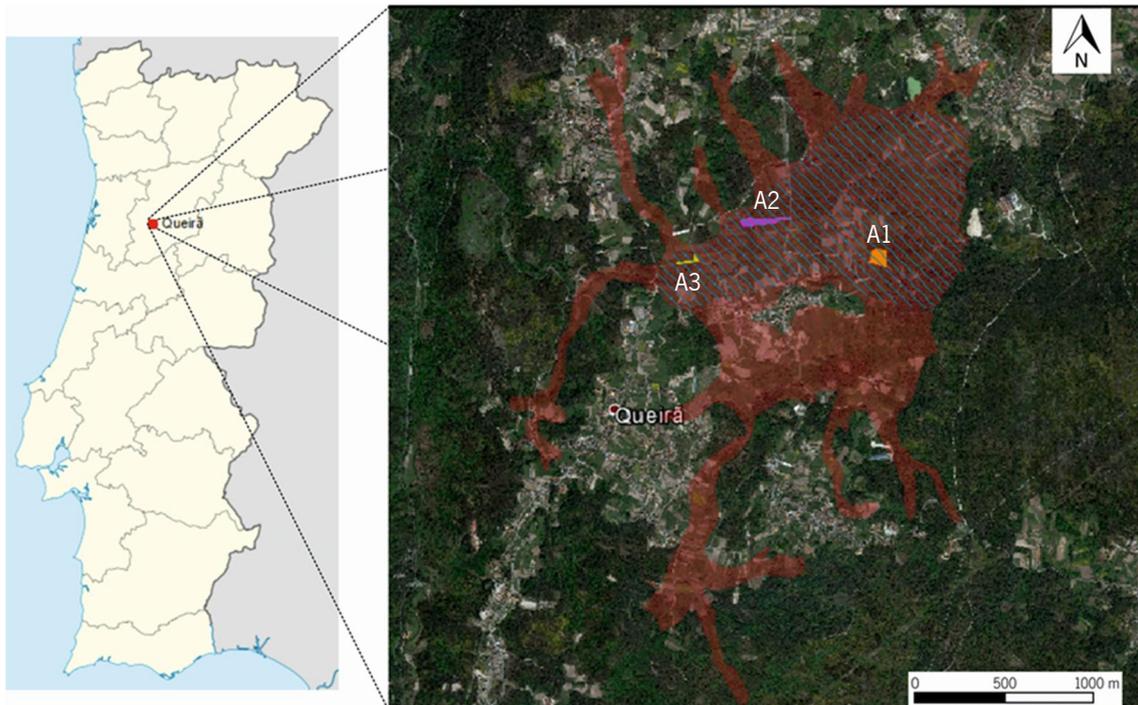
A técnica de ajuste de hipérbolas foi a utilizada no decurso do processamento dos dados, uma vez que é uma técnica mais expedita e não tão morosa quanto a CMP, e pode ser aplicada em qualquer perfil que contenha hipérbolas de reflexão ou de refração. Para o cálculo da velocidade é então necessário proceder-se ao ajuste gráfico de uma função hiperbólica de velocidade, disponível no programa de processamento *ReflexW*, às formas das hipérbolas que se observam nos perfis (Cassidy, 2009b).



### 3. Trabalho prático desenvolvido – Caso de estudo

#### 3.1. Enquadramento do caso de estudo

Para a realização desta dissertação, foram efetuados três estudos de prospeção geofísica, aplicada à exploração mineira, recorrendo ao método de Georradar. Estes estudos foram realizados em três áreas distintas, sobre o chamado “eluvião da Bejanca” localizado, em parte, no antigo Complexo Mineiro da Bejanca, na freguesia de Queirã, concelho de Vouzela, distrito de Viseu (figura 12).



**Figura 12** – Localização da freguesia de Queirã (Viseu), no mapa de Portugal Continental e representação do eluvião da Bejanca (a vermelho), com uma área de 2.97 Km<sup>2</sup>; e da zona de interesse (área com linhas a azul), com uma área de 1.24 Km<sup>2</sup>. A1, A2 e A3 correspondem às áreas estudadas. Altitude de visualização: 6.20 Km (adaptado com base na Carta Geológica de Portugal, Folha 17-A (Viseu), do Instituto Geográfico do Exército, 2008; e no documento “Sampling and Evaluation of the Bejanca Eluviions”<sup>3</sup>).

O motivo para a realização desta dissertação, parte da minha experiência profissional adquirida enquanto geólogo na empresa Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., no Projeto da Bejanca e de várias conversas com consultores externos sobre o potencial do eluvião da Bejanca. Durante estas conversas surgiu o interesse em determinar a capacidade do Georradar em delimitar a profundidade a que se encontra o substrato rochoso. Sendo possível estimar a variação da espessura do solo, que se encontra acima do substrato e ao efetuar grelhas de prospeção será possível estimar, com algum grau de precisão,

<sup>3</sup>Blackheath Resources – [http://www.blackheathresources.com/i/Maps/Bejanca\\_50pits.jpg](http://www.blackheathresources.com/i/Maps/Bejanca_50pits.jpg)

o volume e a tonelagem de solo de uma dada área. A possibilidade de fazer estes cálculos é de grande importância caso, no futuro, se venha a explorar novamente este eluvião, dado o caráter histórico da região a nível mineiro. O sucesso da aplicação da metodologia adotada para este caso prático poderá posteriormente servir de base para a implementação desta técnica de investigação geofísica em outras áreas, possibilitando a delimitação de outros depósitos sedimentares.

Importa referir que a Mina da Bejanca operou de 1900 a 1985, sendo a exploração das mineralizações de estanho (Sn) e volfrâmio (W) feita a partir de trabalhos subterrâneos pouco profundos e poços. Ao serviço da Companhia Portuguesa de Minas, antiga concessionária da mina, Lynton (1953) realizou um relatório preliminar onde reportou uma estimativa dos recursos presentes no eluvião da Bejanca, que podem ser observados na tabela 4. Apesar do eluvião ter sido, em parte, explorado pela mina e através de trabalhos de “pilha”, ainda visíveis nos dias de hoje, há ainda terreno inexplorado. Dados os avanços tecnológicos, com a utilização de maquinaria moderna será possível recolher a fração mais fina de Sn e W que não foi possível recuperar no passado.

No decurso da campanha de amostragens realizada no eluvião, por parte da Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., foram abertos 50 poços, onde foi possível observar uma camada de cascalheira (>3 cm) com uma espessura média de 43 cm (Dados Internos Não Publicados), imediatamente acima do substrato. É nesta camada de cascalheira, que devido às condições de deposição e à elevada densidade dos minerais, são encontrados os minérios de Sn e W que foram explorados no passado.

**Tabela 4** – Estimativa histórica dos minérios de Sn e W no eluvião da Bejanca (Lynton, 1953).

Eluvião da Bejanca				
Recursos Estimados (Toneladas)	Cassiterite Recuperável (kg/Tonelada)	Volframite Recuperável (kg/Tonelada)	Cassiterite (Toneladas)	Volframite (Toneladas)
4,000,000	2.396	0.324	9,584	1,296

Note-se que a zona de maior interesse do eluvião corresponde à área central, como se pode observar na figura 12. Isto ocorre devido à sua configuração e da forma como se insere na freguesia de Queirã, não interferindo com as urbanizações envolventes. A zona central é limitada essencialmente por campos agrícolas, terrenos abandonados, zonas com plantações de árvores (ex: pinheiros e choupos) e zonas de mato denso.

### 3.1.1. Enquadramento Geológico

Do ponto de vista tectónico, o eluvião da Bejanca localiza-se sobre terrenos autóctones pertencentes à Zona Centro-Ibérica (ZCI), integrando-se no flanco NE do antiforma de Porto-Viseu (D3) (Ferreira *et al.*,

2010). De relativo interesse, no âmbito desta tese, são as ocorrências e recursos minerais de estanho (Sn) e volfrâmio (W). Esta região é particularmente rica em mineralizações em Sn e W, pertencendo à província metalogénica tungsténio-estanífera do NW da Península Ibérica (Ferreira *et al.*, 2010). A região estudada encontra-se inserida no antigo Campo Mineiro da Bejanca, sendo constituída por um grande número de antigas concessões mineiras distribuídas pelo concelho de Vouzela (Ferreira *et al.*, 2010). A geologia da região estudada é caracterizada, em traços gerais, pela terceira fase de deformação Varisca (D3), onde predominam as rochas granitóides hercínicas, e os depósitos de cobertura (figura 13), que serão descritos de seguida.

### 3.1.1.1. Rochas Granitóides Tardi a Pós – Tectónicas (relativamente a D3)

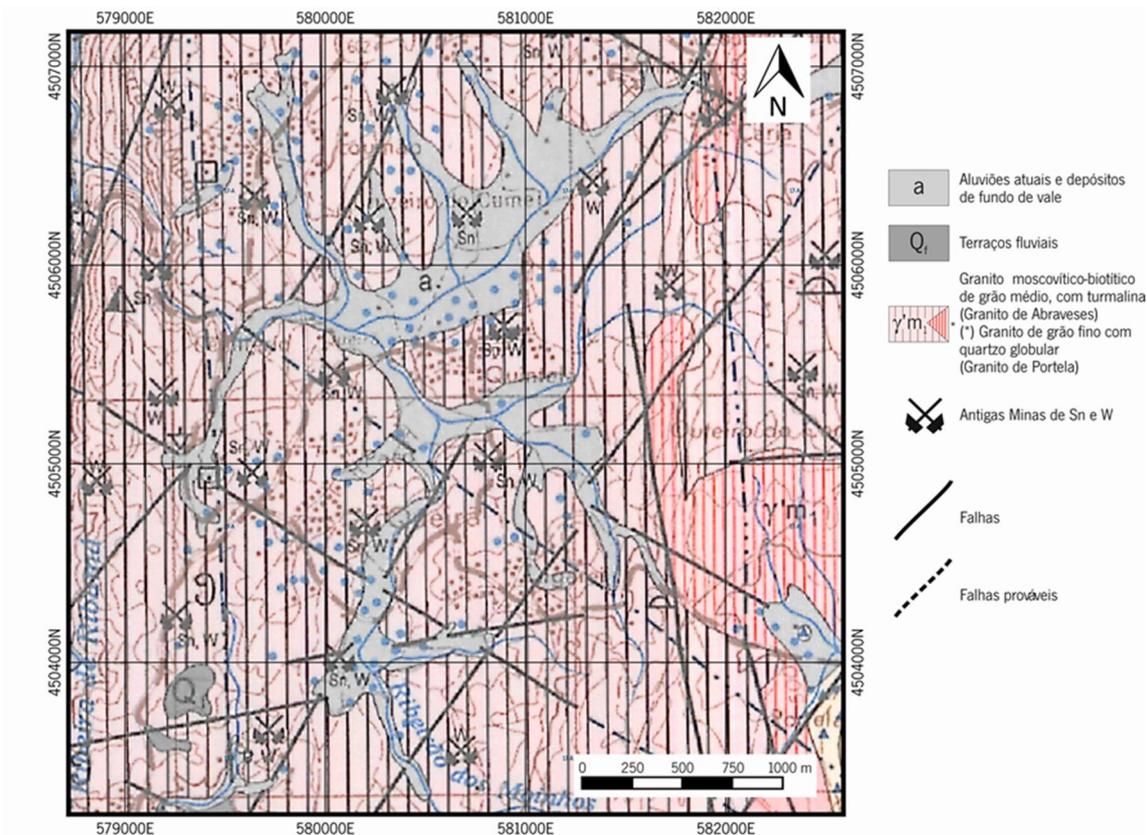
O granito de Abraveses ( $\gamma'm_1$ ) corresponde a uma extensa mancha onde assentam as povoações de Queirã, Carvalhal do Estanho, Abraveses e S. Cosmado, entre outros. É um granito porfiróide, de grão médio a grosseiro, essencialmente moscovítico. A turmalina é abundante e a biotite muito escassa ou ausente. Na proximidade da mancha do granito de Mangualde há um aumento na frequência dos megacristais de feldspato potássico, apresentando frequentemente uma coloração rósea, enquanto diminui a quantidade de moscovite presente (Ferreira *et al.*, 2010). A deformação é geralmente moderada, segundo orientação regional N45°W. Inclui ainda alguns encraves, que podem atingir dimensões métricas, de granitos de grão fino moscovítico-biotíticos com megacristais feldspáticos induzidos. A este granito estão associadas numerosas mineralizações de estanho e tungsténio (Ferreira *et al.*, 2010).

Segundo Lima e Santos (2012) a região do Campo Mineiro da Bejanca é composta por massas de granito greizenizado, e granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite, havendo veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções. O granito contém turmalina e é atravessado por pequenos veios greizenizados com direção NO-SE. Esta área é atravessada por um sistema de falhas com direção N30°O, estando preenchida por quartzo, cassiterite, volframite e argila. A concentração de Sn e W está limitada lateralmente por duas falhas (N-S e NO-SE), aglomerando estas duas mineralizações numa área de fracturação intensa.

Por sua vez, o granito de Portela ( $\gamma'm_1^*$ ) corresponde a uma fácies associada ao de Abraveses, porém é de grão mais fino. É moscovítico, com turmalina abundante e biotite muito escassa, sendo texturalmente homogéneo, exibindo deformação pouco evidente. São frequentes os encraves de granitos mais finos, podendo atingir dimensões métricas (Ferreira *et al.*, 2010).

### 3.1.1.2. Depósitos de cobertura do Cenozóico (Neogénico - Quaternário)

De entre os depósitos de cobertura, temos presentes os aluviões atuais e depósitos de fundo de vale (a) e os terraços fluviais (Q<sub>i</sub>). Os primeiros ocorrem ao longo dos vales de alguns rios e ribeiros, em faixas geralmente estreitas. Neles misturam-se materiais transportados pelos cursos de água com os materiais de escorrência das encostas. Os segundos correspondem a pequenos fragmentos de cascalheira no fundo de alguns vales, onde podem observar-se calhaus rolados de granito, quartzo, xisto e grauwaque (Ferreira *et al.*, 2010).

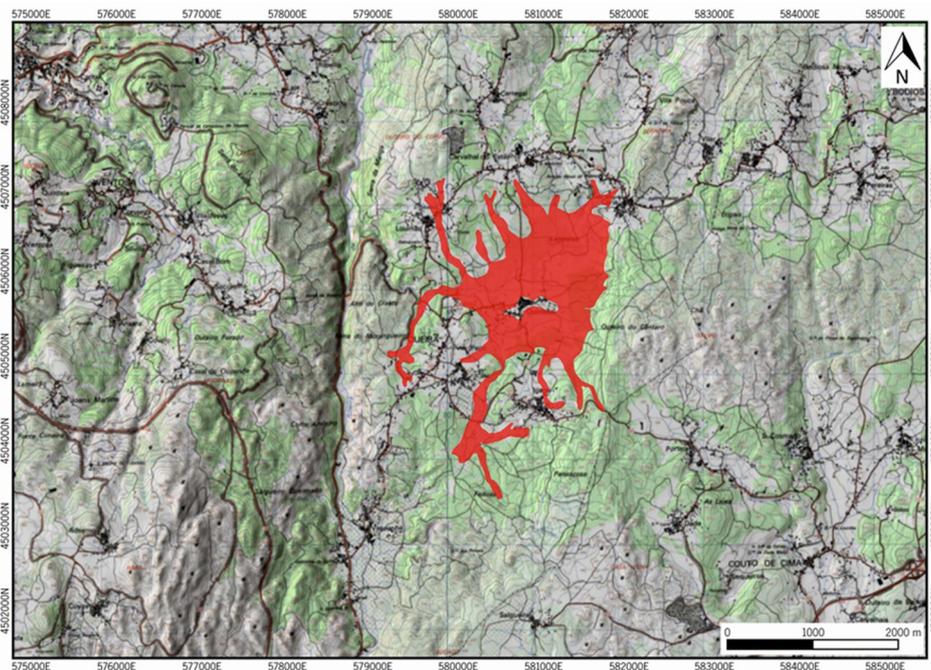


**Figura 13** – Excerto da Carta Geológica de Portugal, Folha 17-A (Viseu), à escala 1:50000 (Instituto Geográfico do Exército, 2008). Sistema de coordenadas: WGS 84/UTM zone 29N.

### 3.1.2. Enquadramento Geomorfológico e Hidrogeomorfológico

O território da carta geológica apresenta uma topografia madura, isto é, modelada por sucessivos ciclos erosivos. À escala local a morfologia é muito condicionada pela erosão, sendo esta influenciada pela constituição das rochas e pela densidade da rede de diáclases. Queirã, à semelhança de Vouzela e S. Pedro do Sul, é uma área manifestamente deprimida no contexto do relevo circundante (Ferreira *et al.*, 2010).

A nível hidrogeomorfológico, o rio Vouga ocupa o sector norte da carta, desenvolvendo-se numa zona de planalto (Planalto da Nave), com altitudes entre os 400 a 600 m. O Rio Zela, o Rio Troço e a Ribeira de Ribamá são os principais afluentes do rio Vouga, bem como os mais importantes cursos de água da zona estudada. A ribeira de Ribamá encontra-se encaixada num vale profundo, muito encaixado e retilíneo (N-S), alargando em Vasconha da Serra numa depressão triangular, limitada por paredes abruptas e retilíneas, revelando uma forte influência tectónica (falha de Penacova-Régua-Verin) (Ferreira, 1978 in Ferreira *et al.*, 2010). No que toca à restante rede hidrográfica, é evidente o forte controlo estrutural, exibindo os cursos de água trechos retilíneos, influenciados pelos vários sistemas de fracturação (Ferreira *et al.*, 2010). Alguns destes atributos poderão ser observados na figura 14.



**Figura 14** – Excerto da Carta Militar de Portugal nº 177 - Vouzela, à escala 1:25000, com sobreposição do relevo (Instituto Geográfico do Exército, 1999). A vermelho encontra-se a área correspondente ao eluvião da Bejanca (área: 2.97 Km<sup>2</sup>) (adaptado com base na Carta Geológica de Portugal, Folha 17-A (Viseu), do Instituto Geográfico do Exército, 2008; e no documento “Sampling and Evaluation of the Bejanca Eluviuns”<sup>4</sup>). Sistema de coordenadas: WGS 84/UTM zone 29N.

## 3.2. Equipamento e software

### 3.2.1. Equipamento utilizado

O sistema de Georradar utilizado no decurso desta dissertação, para os estudos geofísicos, foi o TerraSIRch SIR System-3000, ou simplesmente SIR-3000 (SIR - *Subsurface Interface Radar*), produzida

<sup>4</sup> Blackheath Resources – [http://www.blackheathresources.com/i/Maps/Bejanca\\_50pits.jpg](http://www.blackheathresources.com/i/Maps/Bejanca_50pits.jpg)

pela Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI). Este sistema encontra-se equipado com duas antenas blindadas da GSSI, com uma frequência central de 200 MHz e 400 MHz. O equipamento, ilustrado na figura 15, foi cedido através do Centro de Ciências da Terra da Universidade do Minho.



**Figura 15** – Equipamento de Georradar utilizado no decurso desta dissertação, produzido pela GSSI: antenas de 200 MHz e 400 MHz; SIR-3000; *survey wheel* com odómetro e cabos de ligação (Imagem cedida por Gonçalves, L.).

O SIR-3000 é um sistema leve e portátil, de canal único, podendo ser utilizado em diversas aplicações. A sua função principal é a de unidade de controlo eletrónico, onde são gerados e registados os impulsos de radar, sendo possível ainda o pré-processamento de alguns dados. Possui também um ecrã que permite, para além da definição dos parâmetros de aquisição de dados, a visualização dos radargramas durante e após o levantamento. Na tabela 5 são apresentadas as especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante para este sistema.

**Tabela 5** – Especificações técnicas do SIR-3000 da GSSI (Dados do fabricante<sup>5</sup>).

Sistema	
Antenas	Compatível com a maioria das antenas da GSSI (ver tabela 2)
Nº de Canais	1
Armazenamento da informação	Memória interna de 1Gb Porta <i>Compact Flash</i> - admite cartões <i>compact flash</i> , ou compatíveis até 2 Gb de capacidade
Ecrã	TFT de 8.4", com resolução de 800x600 e 64000 cores Modo de apresentação - <i>Linescan</i> e <i>O-scope</i>
Processador	32-bit Intel StrongArm Rise processor, de 206 MHz
Aquisição de Dados	
Formato dos ficheiros	RADAN (.dzt)
Taxa de amostragem – exemplos (scan/sec.) e (sample/scan)	220 traços/s a 256 amostras/traço 120 traços/s a 512 amostras/traço
Tamanho da amostragem ( <i>sample size</i> )	8-bit ou 16-bit (definido pelo utilizador)
Intervalo entre traços ( <i>scan interval</i> )	Definido pelo utilizador
Número amostras por traço	256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192 (definido pelo utilizador)
Modo de aquisição de dados	Contínuo, distância, manual
Janela de Tempo ( <i>Time range</i> )	0 - 8000 nanossegundos (definido pelo utilizador)
Ganhos	Manuais ou automáticos, 1 - 5 pontos (-20 a +80 dB)
Filtros	Verticais: <i>Low-Pass</i> e <i>High-Pass</i> IIR e FIR Horizontais: <i>Staking</i> , remoção de <i>Background</i>
Condições de funcionamento	
Temperatura	-10°C até 40°C
Frequência do Pulso emitido	10 kHz
Bateria	Lítio, 10.8 V DC, interna, amovível
Mecânica	
Dimensões (cm)	31.5 x 22 x 10.5 cm
Peso (com bateria)	4.1 Kg
Ambiental	Resistência à água

Como já referido, no decurso dos levantamentos geofísicos foram utilizadas duas antenas blindadas, produzidas pela GSSI, com frequência central de 200 MHz e 400 MHz em modo mono-estático, cujas especificações técnicas são apresentadas na tabela 6.

**Tabela 6** – Especificações gerais das antenas de 200 MHz e 400 MHz da GSSI (dados do fabricante).

Antena 200 MHz		Antena 400 MHz	
Fabricante	GSSI	Fabricante	GSSI
Modelo	5106A	Modelo	5103A
Profundidade máxima	8 m (para $\epsilon_r=5$ )	Profundidade máxima	4 m (para $\epsilon_r=5$ )
Dimensões	60 x 60 x 30 cm	Dimensões	30 x 30 x 17 cm
Peso	20.5 Kg	Peso	5 Kg

Foi ainda utilizado um odómetro, também produzido pela GSSI, acoplado à antena em uso e ligado ao SIR-3000, que possibilita o registo das distâncias percorridas pelo equipamento de Georradar. Este odómetro permite a recolha dos dados em modo de distância, possibilitando assim definir a densidade

<sup>5</sup> GSSI – <http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-SIR3000Brochure.pdf>

de aquisição de dados por unidade de distância percorrida. Deste modo é possível localizar de forma relativamente precisa todas as reflexões registadas pelo sistema.

Por último, de forma a registar o início e o fim de cada perfil foi utilizado um GPS (Global Positioning System) – modelo GPSmap 60CSx, produzido pela Garmin.

### 3.2.2. Software utilizado

O processamento dos dados adquiridos durante uma campanha geofísica é um procedimento fundamental e imprescindível para se conseguir realizar uma adequada interpretação das reflexões registadas. É por isso necessário utilizar software específico para o processamento e visualização dos dados obtidos, existindo vários softwares de carácter livre e comercial à disposição dos utilizadores.

No decurso deste trabalho de investigação foram utilizados os seguintes programas de processamento e visualização: ReflexW e Reflex 2Dquick (versão 2.5.9). Este conjunto de programas Reflex foram desenvolvidos pelo alemão Karl-Josef Sandmeier, sendo muito utilizados em meios académicos e empresariais, devido à sua grande capacidade de processamento e tratamento de dados, assim como pela apresentação e visualização da informação gerada (Gonçalves, 2013).

Dos dois programas referidos anteriormente, o mais potente é o ReflexW. Este programa foi desenhado para processar dados de Georradar e Sísmica e possui três módulos integrados, dos quais um de processamento e visualização 2D, outro de processamento 3D e um terceiro de simulação. De entre estes três módulos, o utilizado no processamento dos dados foi o 2D. Este módulo consegue operar uma vasta quantidade de informação em simultâneo e possui vários tipos de processamento, nomeadamente 1D e 2D, e numerosos filtros, podendo ser ajustados de modo a servir o utilizador. Uma das vantagens deste módulo é a possibilidade de se definir uma sequência de processamento que pode ser aplicada, automaticamente, a um conjunto de ficheiros, facilitando assim o processamento de dados.

No decorrer do processamento foi também utilizado o Reflex 2DQuick. Este programa é bastante útil para uma primeira visualização e análise inicial dos dados, sendo inclusive uma boa opção para o tratamento dos perfis de Georradar caso estes não necessitem de um processamento mais detalhado. O Reflex 2DQuick permite uma rápida importação, processamento e visualização dos perfis obtidos, contudo está limitado na definição de alguns parâmetros.

Foi ainda utilizado, no âmbito desta dissertação, o *software* Surfer 11 desenvolvido pela Golden Software. O Surfer 11 é um programa bastante intuitivo, com um vasto leque de ferramentas, sendo também muito

utilizado em meios académicos e empresariais uma vez que serve uma vasta gama de funções, como por exemplo: modelação batimétrica e de terrenos, análise de superfícies, mapeamento de bacias hidrográficas e superfícies 3D, cálculo de volumes, entre outros. A opção de utilizar este programa deveu-se à necessidade de criar um mapa 3D e de isolinhas com as diferentes profundidades do substrato e da necessidade de calcular o volume de cada área estudada.

### **3.3. Método de trabalho**

#### **3.3.1. Seleção das áreas de estudo**

Como foi referido anteriormente, para a realização desta dissertação foram estudadas três áreas distintas. Estas áreas foram escolhidas tendo em conta alguns critérios definidos aquando a realização dos trabalhos preliminares. Em primeiro lugar, foi feita uma análise distanciada através do GoogleEarth™, onde se observou, após a inserção das respetivas coordenadas, a localização dos poços abertos durante a campanha de sondagens realizada pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., com o intuito de serem escolhidas áreas onde fosse possível realizar perfis entre dois ou mais poços, de modo a auxiliar posteriormente a interpretação dos dados. Com este objetivo em mente foram selecionados quatro áreas a investigar, contudo apenas três foram objeto de estudo. Isto resultou de condições logísticas e a restrições financeiras.

Um outro fator a ter em consideração na seleção das áreas foi a altura do ano em que os trabalhos iriam começar. Tendo em vista que os trabalhos começaram nos finais de Outubro e acabaram a meio de Novembro, foi necessário ter em conta as condições climáticas e a precipitação ocorrente. Há várias zonas do eluvião que alagam assim que os períodos de precipitação são mais regulares e intensos, o que impossibilitaria a passagem dos utilizadores com o equipamento, sendo por isso necessário realizar os levantamentos o mais rápido possível.

O eluvião, como já foi referido num capítulo anterior (capítulo 3.1.), é composto por campos agrícolas, terrenos abandonados, zonas com plantações de árvores e zonas de mato denso, ligados por caminhos de terra batida bastante estreitos e de difícil passagem devido às vedações e aos muros em pedra. De modo a evitar problemas logísticos que daí pudessem surgir, foram escolhidas áreas com bom acesso ao local a estudar, de forma a garantir a passagem do equipamento e do veículo.

Por último, e tendo em conta que as três áreas escolhidas encontram-se em terrenos agrícolas, foi necessário entrar em contacto com alguns dos proprietários de forma a garantir o seu consentimento para a realização dos trabalhos prospetivos.

### 3.3.2. Regras de boas práticas de operação com Georradar

Em primeiro lugar, e antes de partir para a aquisição de dados, é necessário ter em vista o objetivo de um dado estudo, e com base neste objetivo decidir qual o método de prospeção mais adequado. Cada método de prospeção tem as suas vantagens e limitações, e a prospeção com o Georradar não é uma exceção. Conhecer o objetivo do estudo permite também selecionar o equipamento a utilizar durante os levantamentos.

Os trabalhos preliminares são também muito importantes e imprescindíveis para um bom entendimento e execução do estudo. Aqui tenta-se reunir toda a informação acerca da zona e do objetivo do trabalho, podendo passar por uma simples pesquisa bibliográfica, análise distanciada (Ex: GoogleEarth™ ou BingMaps™) ou conversas com especialistas ou com a população local. Uma conjugação destes será o ideal. A existência de dados de sondagens ou de cortes estratigráficos realizados no local ou nas proximidades dos estudos são também de extrema importância, caso seja possível consulta-los, assim como dados de outros estudos geofísicos e toda a informação geológica disponível. Contudo muitos destes dados podem não ser de fácil acesso. Isto permite um planeamento adequado da campanha de prospeção e um conhecimento das condições do local a estudar.

É de notar que uma vez adquirida uma ideia da área a estudar são muitas vezes planeados, previamente, perfis num determinado local com uma dada direção. São então traçados, se possível, perfis em zonas planas ou pouco abruptas, para que seja possível deslocar facilmente o equipamento de GPR. Não deverá, portanto, haver obstáculos que dificultem a passagem. Devem também ser evitadas áreas que possam conter demasiadas fontes de potencial interferência, uma vez que a aquisição de dados poderá ficar corrompida. No entanto, como as condições no terreno variam e nem sempre a análise distanciada reflete o que se encontra no local a estudar, pode acontecer que chegado ao dia dos levantamentos haja elementos que dificultem ou impossibilitem a passagem do equipamento, o que obriga ao reposicionamento dos traçados do perfil e à devida anotação destas alterações. Este traçamento é usualmente auxiliado com a utilização de fitas métricas ou outro tipo de fitas ou cordas.

Já no local a estudar e previamente aos levantamentos é necessário ainda garantir a devida calibração dos equipamentos e inserir os corretos parâmetros de aquisição de dados. Convém prestar particular atenção a este último ponto, pois a incorreta inserção dos parâmetros de aquisição fará com que seja necessário repetir os levantamentos. Durante a realização dos perfis para além de marcar a direção do deslocamento das antenas e as coordenadas de início e do final do perfil com um GPS, convém também cravar estacas no solo nestas duas posições, caso seja necessário, por exemplo, repetir mais tarde o

levantamento ou utilizar uma antena com uma frequência central diferente. Convém ainda ter um bom registo fotográfico do local a estudar, pois é vital para memória futura.

Imprescindível neste tipo de trabalhos é o registo dos levantamentos para memória futura. Atendendo a um princípio básico do trabalho de campo e de investigação, definiu-se uma ficha de campo onde foram registados todos os parâmetros de utilização do Georradar e todos os dados relevantes de cada levantamento (figura 16).

Local: <a href="#">Queirã, Vouzela</a>		Data: 21/10/2015		IDn° <b>1</b>	
<i>Survey Details</i>					
Survey Name	C_A				
Survey ID	F_040   F_056				
Coordenadas	Início	581294.10E/4505798.68N	Fim	581295.97E/4505893.84N	
	Direção	S - N	Comprimento (m)	93.74   93.78	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, mais quente da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Pousio				
Surveyor	<a href="#">Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção</a>				
<i>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</i>					
Survey Type	<a href="#">Georradar (GPR)</a>				
Sistema	<a href="#">TerraSIRch SIR System-3000</a>				
Antena	<a href="#">200 MHz   400 MHz</a>				
Aquisição de Dados	<a href="#">Distância</a>				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
Nº Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<i>Observações</i>					
Perfil começa no caminho de terra batida, e entra num campo parcialmente em pousio. Vegetação rasteira, contudo afetou o acoplamento das antenas ao solo. Primeiro poço a 1.5 m à esquerda do perfil entre os 18-22 m. Atenção à presença de um monte de estreme perto do 1º poço, perfil passa ao lado. Segundo poço a 1 m à direita do perfil entre os 90-92 m.					

**Figura 16** – Exemplo da ficha de campo utilizada para anotações. Na mesma ficha constam os dados das antenas de 200 e 400 MHz. Os dados a azul foram pré-introduzidos em cada ficha, uma vez que não alteram.

Nesta ficha de campo deverá constar informação referente: à data dos levantamentos; às condições climáticas; à identificação do projeto; às coordenadas de início e fim do perfil; ao comprimento do perfil; ao nome dos ficheiros correspondentes aos dados registados; à identificação dos técnicos envolvidos; ao equipamento utilizado; aos parâmetros de aquisição de dados; e a observações do ambiente em que decorre o levantamento (ex: geologia, vegetação, obstáculos, alterações no relevo,

etc.). As fichas de campo correspondentes às áreas estudadas podem ser consultadas nos anexos 1, 2 e 3.

Por último importa referir que a organização e localização de ficheiros deve obedecer a uma arquitetura que permita simplificar o futuro acesso a estes dados.

### 3.3.3. Definição de parâmetros de aquisição de dados

Para a aquisição de dados foram definidos um conjunto de parâmetros, sendo que nesta fase serão discutidos os seguintes: taxa de amostragem; intervalo entre traços; e janela de tempo.

1. Taxa de amostragem: corresponde à periodicidade com que o sinal deve ser emitido. Representa a quantidade de amostras recolhidas num determinado período de tempo e é comumente medido em Hertz (Hz). A taxa de amostragem pode ser definida matematicamente através da seguinte equação (Lasmar, 2012),

$$f_s = 1/\delta t$$

Onde  $f_s$  representa a taxa de amostragem e  $\delta t$  o incremento de tempo entre amostras.

2. Intervalo entre traços: corresponde a um parâmetro introduzido no *software* de aquisição de dados que determina a distância, em metros, entre cada traço. Lembra que cada traço é constituído pelo conjunto das várias amostras num determinado intervalo de tempo. Para a obtenção de uma maior resolução horizontal terá de ser inserido um intervalo entre traços menor, o que aumentará a densidade de traços por metro (Franco, 2010).
3. Janela de tempo: é determinada com base na profundidade esperada do alvo ou interface, e é definida tendo em conta o tempo de ida e volta ( $t$  – em nanossegundos), que a onda eletromagnética demora entre a antena emissora, o alvo e a antena recetora (Fernandes, 2006). A janela de tempo pode então ser determinada pela seguinte expressão,

$$t = \frac{2h}{v}$$

Onde  $h$  corresponde à profundidade esperada para um determinado alvo ou interface e  $v$  corresponde à velocidade de propagação das ondas no meio.

A definição dos parâmetros de aquisição dos dados de Georradar foram estabelecidos após um rápido teste de campo. Utilizaram-se, como já referido anteriormente, duas antenas blindadas com frequência central de 200 e 400 MHz. Os levantamentos foram adquiridos com uma taxa de amostragem de 60 Hz com 1024 amostras por traço. Tendo em conta a profundidade esperada do substrato, foi utilizada uma

janela de tempo de 150 e 120 ns (para a antena de 200 e 400 MHz). O intervalo entre o registo de cada traço foi de 2 cm.

#### **3.3.4. Aquisição de dados**

Uma vez definidos os parâmetros de aquisição de dados e feita a calibração do equipamento de Georradar foi possível proceder-se, segundo alinhamentos pré definidos no terreno, ao registo da informação do subsolo. Estes alinhamentos pré definidos foram marcados com o auxílio de duas fitas métricas, uma de 50 m e outra de 100 m, de modo a garantir um perfil mais reto possível, para além de servirem como guias orientadoras. Foram ainda colocadas estacas para marcar o início e o final de cada perfil. O método de aquisição adotado no decurso destes trabalhos foi o de reflexão. Foram ainda utilizadas duas antenas com frequências centrais distintas, 200 e 400 MHz, o que implicou duas passagens com o equipamento de Georradar sobre um dado perfil. Importa referir que dada a natureza deste estudo, não foi utilizada uma grelha de levantamentos muito condensada, uma vez que seria contraproduativo, dados os objetivos propostos a alcançar.

Manteve-se também uma constante atenção, no decurso dos levantamentos aos radargramas que se iam gerando de modo a anotar as reflexões mais evidentes e tornar mais simples a localização e posterior interpretação dos dados. Foram também anotados todas as observações relevantes da área a prospectar. O início e o fim de cada perfil foi registado recorrendo a um GPS, com um erro médio de 2 m. Os percursos efetuados foram também registados utilizando o GPS. Para memória futura foi feito o registo fotográfico do início e do final de cada área estudada.

É importante mencionar que a disposição dos perfis resultou das dimensões e da forma dos campos agrícolas, assim como dos obstáculos encontrados. Apesar das adversidades encontradas durante os levantamentos houve sempre um esforço de manter os perfis o mais paralelo possível entre si.

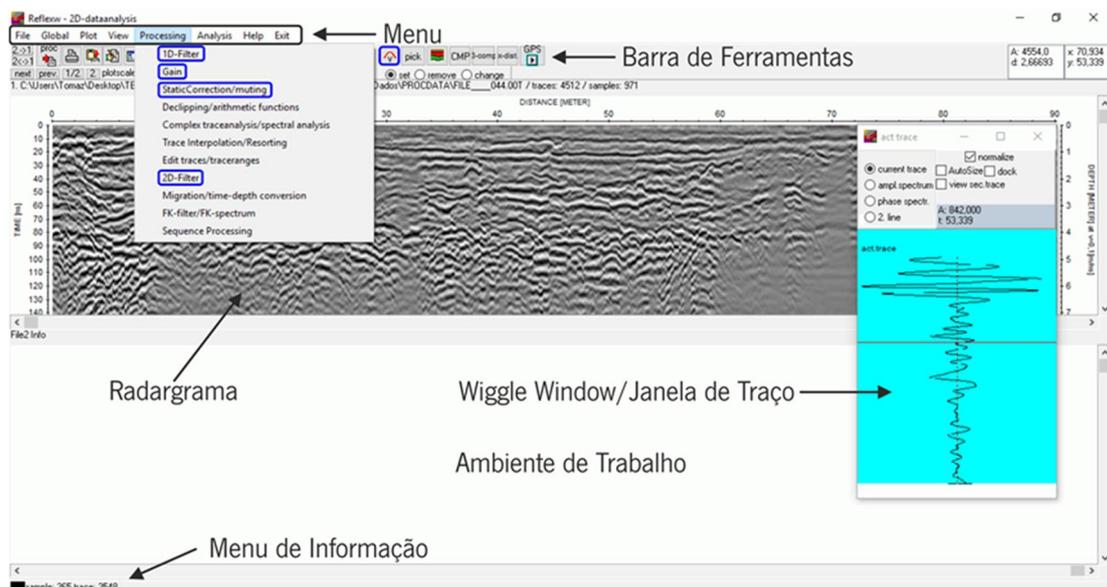
#### **3.3.5. Processamento de dados**

Como já foi referido num capítulo anterior, o processamento dos dados adquiridos durante uma campanha de prospeção geofísica é um processo fundamental para a realização de uma adequada interpretação das reflexões registadas. No entanto, segundo Cassidy (2009b) o processamento dos dados de Georradar é muitas vezes considerada uma “arte negra”, sendo por isso necessário seguir algumas orientações práticas logo de início. Deste modo o processamento será mais consistente, eficiente e realista.

De acordo com Cassidy (2009b) o processamento deverá ser o mais simples possível e está inteiramente dependente da qualidade dos dados em bruto, de limitações relacionadas com os custos e o tempo disponível, assim como das necessidades particulares do utilizador. Deverá ainda ser evitado o sobreprocessamento dos dados, uma vez que quanto mais sofisticado o método de processamento, mais provável será a introdução de potenciais artefactos nos dados. Importa notar que o utilizador deverá ter conhecimento do impacto que a aplicação dos vários filtros e métodos de processamento terão sobre os dados, pois esta é a única maneira de verificar se são ou não introduzidos artefactos. Por último, o utilizador deverá ser sistemático e consistente nas várias etapas do processamento de dados, e se possível utilizar os mesmos parâmetros em conjuntos de dados equivalentes e anotar as informações de cada etapa do processamento. Este procedimento é vital ao tentar-se processar um grande número de secções de GPR (Cassidy, 2009b).

### 3.4. Tratamento e interpretação de dados

O tratamento aplicado sobre os dados adquiridos em campo serviu para eliminar, o mais possível, as perturbações presentes nos radargramas, como ruído, reverberações, reflexões fantasma ou interferências, e desta forma melhorar a visualização dos dados de GPR. Para isso, foi necessário introduzir os dados no programa de processamento ReflexW, como exemplificado na figura 17.

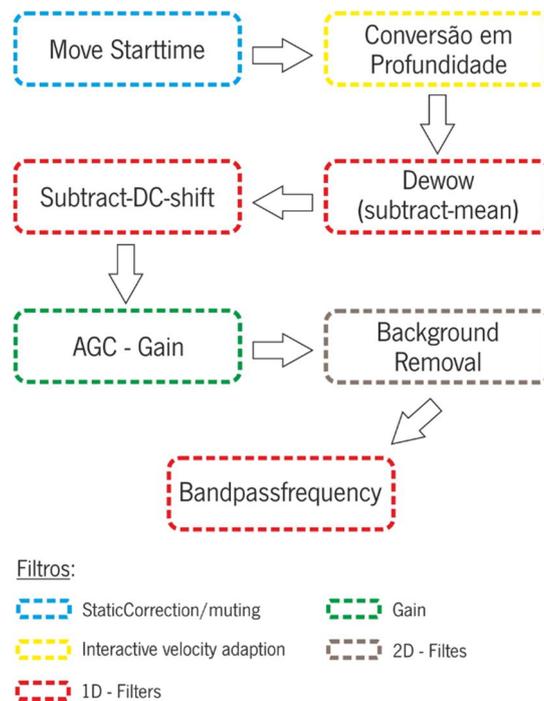


**Figura 17** – Ambiente de trabalho do *software* ReflexW 2D Data Analysis versão 7.5.9, com indicação (a azul) das principais ferramentas utilizadas para este trabalho.

Para se proceder ao processamento dos dados é necessário ter em conta três fatores de extrema importância, que são segundo Yilmaz (1987): a seleção de uma sequência de processamento apropriada; a escolha correta do conjunto de parâmetros para cada etapa do processamento; e uma boa avaliação

das alterações obtidas de cada etapa do processamento, assim como, a identificação de problemas relacionados com a seleção incorreta de parâmetros.

Após a consulta de vários artigos relacionados com o processamento de dados de Georradar (Neal, 2004; Banks & Johnson, 2011; Butalia *et al.*, 2012; Nováková *et al.*, 2013), chegou-se à sequência de processamento demonstrada na figura 18.



**Figura 18** – Sequência de processamento utilizada sobre os dados recolhidos em campo.

Os dados foram inicialmente processados com a adição do filtro “fk migration (Stolt)”, contudo este foi retirado após afetar a qualidade da imagem final dos radargramas. Este problema resultou do facto deste filtro considerar a mesma velocidade (m/ns) para todo o perfil. Porém, a velocidade não é constante ao longo do perfil, devido às diferentes propriedades dos materiais, provocando assim alterações nos dados e afetando a imagem resultante.

Importa mencionar que a determinação da velocidade das ondas eletromagnéticas e consequente conversão em profundidade foi realizada através da técnica de ajuste de hipérbolas, já mencionada e explicada no capítulo 2.5.7. O valor encontrado através da aplicação desta técnica foi de 0.07 m/ns.

Os dados foram processados individualmente, podendo observar-se na tabela 7 um exemplo dos valores adotados para o caso da antena de 200 e 400 MHz.

**Tabela 7** – Sequência de processamento aplicada sobre os ficheiros F\_040 e F\_056, referentes ao perfil 1, Campo A da Área 1. Os valores a vermelho mantiveram-se inalterados durante a sequência de processamento. Os restantes dados sofreram ligeiras alterações, adotadas individualmente para cada caso.

Seq. Processamento	Antena 200 MHz	Antena 400 MHz
<i>Move Starttime</i>	-7.7	-3.3
Conv. Profundidade	0.07	0.07
<i>Dewow (subtract-mean)</i>	142.09 ns	116.60 ns
<i>Subtract-DC-shift</i>	142.09 ns	116.60 ns
AGC - Gain	10 ns <sup>6</sup>	10 ns
<i>Background Removal</i>	142.09 ns <sup>7</sup>	116.60 ns
<i>Bandpassfrequency</i>	40.16 <sup>8</sup> / 501.96 <sup>9</sup>	50.20 / 702.75

A interpretação de um radargrama é, segundo Neal (2004) e Robinson *et al.* (2013), inteiramente subjetiva e dependente do grau de conhecimento e experiência do utilizador. De acordo com Jol & Bristow (2003), após o processamento dos dados é necessário uma interpretação independente de dados auxiliares, uma vez que as interpretações baseadas nestes últimos podem acabar por negligenciar aspetos importantes no perfil de GPR. Com isto em mente, a primeira abordagem aos radargramas foi no sentido de identificar possíveis padrões que auxiliassem na estimativa da profundidade do *substrato*. Neste sentido e após analisar cuidadosamente os radargramas, considerou-se a possibilidade da atenuação presente ser um indicador da proximidade do substrato rochoso. Estas indicações parecem indicar a alteração das características dos materiais do subsolo, nomeadamente a presença de granito greizenizado, bastante alterado nos primeiros 20 cm (em média). No entanto estes dados por si só não chegam para provar a proximidade do substrato, uma vez que a presença de água é um fator a ter em consideração na atenuação do sinal de radar.

Foram então consultados os dados auxiliares e inseridos nos radargramas a posição e a profundidade atingida pelos poços realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. Contudo, apenas 14 dos 48 perfis realizados passaram sobre o local onde foram feitos os poços. Com base na introdução destes dados e na análise da atenuação, foi possível estabelecer um padrão para a interpretação dos radargramas. Seguindo este padrão foram então interpretados todos os dados, onde a falta de indicadores auxiliares levou a uma extrapolação e correlação na análise dos radargramas, como pode ser observado nos anexos 4, 5 e 6.

---

<sup>6</sup> Window length

<sup>7</sup> End time

<sup>8</sup> Lower cutoff

<sup>9</sup> Upper cutoff

Acredita-se que a interpretação final representa um modelo fiel da estimativa da profundidade do substrato.

### 3.5. Modelação 3D e Cálculo de Volumes

Para a modelação 3D das áreas estudadas foi utilizado o *software* Surfer 11, desenvolvido pela Golden Software. O procedimento utilizado para a realização dos modelos tridimensionais será explicado de seguida.

Em primeira mão foi necessário abrir uma nova “*Worksheet*” no Surfer 11 (em alternativa poderia ser utilizada uma folha Excel), onde foram inseridos as coordenadas WGS 84/UTM zone 29N nas colunas “x” e “y”. Na coluna “z” foram inseridos, numa primeira fase, os dados referentes à superfície do terreno, sendo que para simplificar os cálculos foi considerado um valor de 100. Uma vez guardado o ficheiro em formato “*Text Data*” (.txt) foi realizado o mesmo processo, mas desta vez com o valor de base do substrato. Estes dois ficheiros foram então convertidos em ficheiros “*Grid*” (.grd), tendo sido de seguida acionada a função “*Math*” que permite subtrair o ficheiro “*Grid*” da superfície do terreno ao ficheiro do nível base do substrato. O ficheiro resultante desta função pode agora ser aberto com a opção “*New Contour Map*” que nos dá, basicamente, um mapa de isolinhas do substrato (Anexo 8). De forma a tornar o mapa de isolinhas mais apelativo e visualmente mais fácil de interpretar, foi utilizada a função “*New 3D Surface*” que permite converter este tipo de ficheiros em superfícies 3D. Os resultados da aplicação deste *software* podem ser consultados no Anexo 8.

Importa referir que as coordenadas inseridas e os valores introduzidos foram recolhidos a cada 5 metros (Anexo 7), representando assim cada perfil com um elevado grau de precisão, uma vez que não se justificaria o tempo necessário para fazê-lo a cada metro. De forma a evitar extrapolações adicionais do *software* de processamento, foram excluídos parte dos dados referentes aos perfis 2 e 24, encurtando-se assim o comprimento destes.

Sendo um *software* versátil, o Surfer 11 dispõe de uma função de cálculo de volumes, tendo sido utilizado para calcular posteriormente a tonelagem das áreas estudadas. Para se aceder a esta função basta clicar em “*Grid*”, na barra de ferramentas e depois seleccionar “*Volume*”. Esta função utiliza os dados contidos no ficheiro “*Grid*” do substrato rochoso. O *software* calcula o volume por três métodos distintos, podendo estes resultados ser consultados na tabela 8.

**Tabela 8** – Cálculo do volume das áreas estudadas no decurso desta dissertação. Resultados obtidos através do *software* Surfer 11. Resultados apresentados em pés ao cubo (ft<sup>3</sup>) e metros cúbicos (m<sup>3</sup>).

Cálculo volume por:	A1	A2	A3
<i>Trapezoidal Rule</i>	26600,03	13787,38	4085,41
<i>Simpson's Rule</i>	26600,09	13787,35	4084,92
<i>Simpson's 3/8 Rule</i>	26600,03	13786,82	4085,15
<b>Média (ft<sup>3</sup>)</b>	<b>26600,05</b>	<b>13787,18</b>	<b>4085,16</b>
<b>Média (m<sup>3</sup>)</b>	<b>753.23</b>	<b>390.41</b>	<b>115.68</b>

Com os volumes das áreas estudadas já calculados, foi possível proceder-se à fase seguinte, ao cálculo da tonelagem destas áreas. Importa referir que os dados utilizados ao nível da porosidade, índice de saturação e densidade são puramente teóricos, uma vez que este objetivo surgiu numa fase avançada da redação desta dissertação e como tal não foi possível analisar e efetuar os cálculos necessários ao solo. Contudo, crê-se que os dados utilizados e disponíveis para consulta no Anexo 9 possam representar as condições dos locais estudados à altura dos levantamentos. Os resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

As fórmulas matemáticas utilizadas para os cálculos efetuados foram retirados de Gonçalves, H. *et al.* (2014), onde:

- Para o cálculo do volume de vazios ( $V_v$ ) temos:

$$V_v = V_t \times n\%$$

Onde  $V_t$  corresponde ao volume total e  $n\%$  à percentagem de porosidade do solo;

- Para o cálculo do volume de sólidos ( $V_s$ ) temos:

$$V_s = V_t - V_v$$

- E para o cálculo do volume de água ( $V_a$ ) no solo temos:

$$V_a = V_v \times n\%$$

Onde  $n\%$  corresponde ao índice de saturação, em percentagem.

### **3.6. Resultados**

Os resultados do processamento dos radargramas foram compilados e encontram-se disponíveis para consulta nos anexos 4, 5 e 6 correspondendo respetivamente à Área 1, 2 e 3. Os dados referentes à modelação 3D e ao cálculo da tonelagem também podem ser consultados através dos anexos 8 e 9.

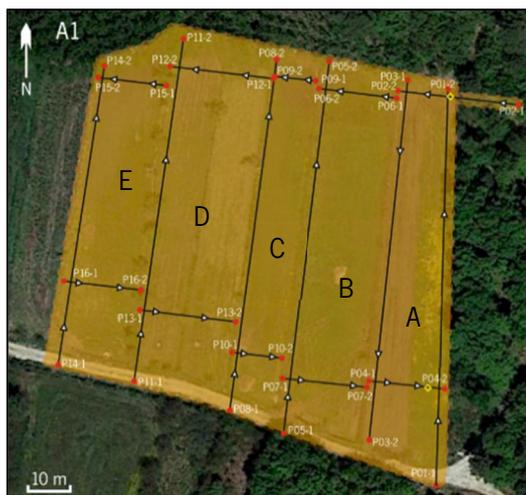
Numa rápida análise, uma vez que o assunto será tratado e discutido no capítulo 4, é já bem visível a grande variabilidade da profundidade do substrato, em particular na Área 1 onde num espaço de 70 m existe um desnível de 2.95 m.

Serão de seguida apresentados para cada área de estudo um par de radargramas, já devidamente processados e interpretados, correspondentes às duas antenas utilizadas para os levantamentos (200 e 400 MHz). Os radargramas apresentados abaixo foram efetuados sobre alguns dos poços realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., o que possibilita uma melhor interpretação do substrato. Serão ainda destacadas as principais dificuldades na aquisição dos dados durante os levantamentos associados a cada área de estudo assim como a configuração da grelha de levantamentos. Os valores calculados referentes à tonelagem das áreas serão também apresentados.

Poderão igualmente ser observadas as interfaces correspondentes à zona de perturbação antrópica assim como algumas reflexões mais acentuadas referentes a blocos graníticos de maiores dimensões, ou de outra fonte, presentes no solo e subsolo.

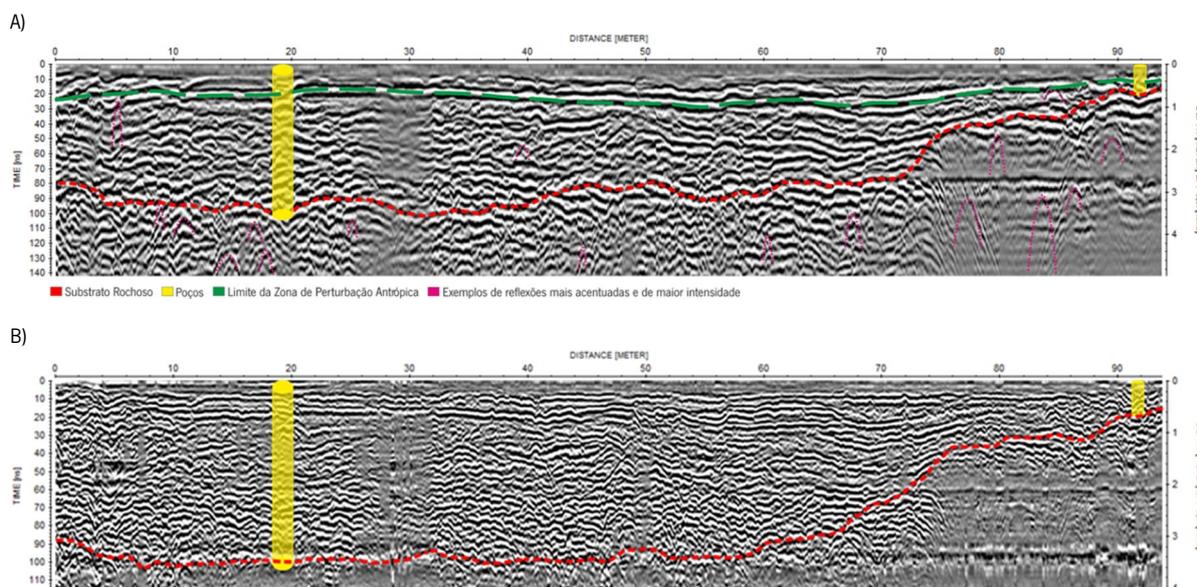
#### **3.6.1. Local de Estudo – Área 1**

O local de estudo assinalado como Área 1 corresponde no total a um conjunto de cinco campos, com a designação A - B - C - D - E. Durante os trabalhos de prospeção foram levantados 32 perfis, sendo que metade foram realizados com a antena de 200 MHz e a outra metade com a antena de 400 MHz. A disposição destes levantamentos, assim como a sua direção estão demonstrados na figura 19. Esta disposição da grelha de levantamentos resultou do facto dos campos estarem limitados por muros e vedações, impossibilitando por isso os desejados perfis contínuos nas direções O - E. No anexo 1 podem ser consultadas as fichas de campo associadas aos levantamentos da Área 1.



**Figura 19** – Área de investigação 1 (A1), composta pelos campos A, B, C, D e E. A amarelo estão os poços abertos durante a campanha de amostragem. Altitude de visualização: 235 m.

Na figura 20 podemos observar o produto do processamento e interpretação dos ficheiros identificados como F\_040 (antena 200 MHz) e F\_056 (antena 400 MHz), correspondentes ao perfil 1. Nestes podemos identificar a amarelo a localização de dois poços. O primeiro poço localiza-se entre os 18 e os 20 m, atingindo uma profundidade de 3.70 m até ao granito greizenizado (substrato) enquanto o segundo encontra-se na parte final do perfil entre os 91 e os 92 m, atingindo uma profundidade de apenas 0.75 m até ao substrato rochoso. A profundidade média desta área ronda os 2.54 m, atingindo os 3.87 m na zona mais profunda e os 0.60 m na zona mais superficial.



**Figura 20** – Radargramas correspondentes ao Campo A, Perfil 1, com a devida interpretação. Orientação: S - N. A vermelho observa-se o nível interpretado do substrato e a amarelo a localização e respetiva profundidade dos poços realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_040. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 93.74 m; B) Identificação F\_056. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 93.78 m.

Os resultados do processamento e da interpretação dos dados adquiridos na Área 1 podem ser observados na sua totalidade através da consulta do anexo 4.

Relativamente à tonelagem da Área 1, os cálculos efetuados apontam para um valor de 1303.087 toneladas de solo a ser extraído de modo aproveitar a fração mais fina de Sn e W não aproveitada no passado.

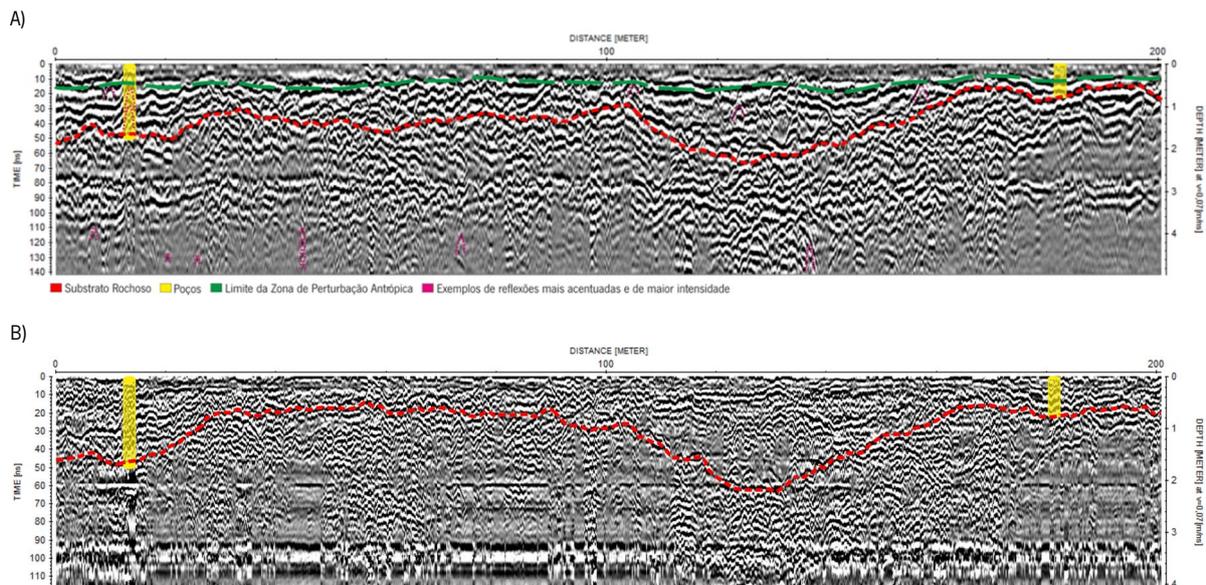
### 3.6.2. Local de Estudo – Área 2

O local de estudo indicado como Área 2 é composto pelo campo designado por F. No decorrer dos trabalhos de prospeção foram realizados 8 perfis, sendo que quatro foram adquiridos com a antena de 200 MHz e os restantes com a antena de 400 MHz. O campo F à semelhança dos anteriores acabou por revelar algumas dificuldades no que toca aos levantamentos, que acabaram por condicionar o perfil 19 e impossibilitando assim o desejado paralelismo entre perfis, como se pode observar na figura 21. Esta condicionante resultou do facto de parte do terreno, numa extensão de cerca de 90 m (O–E), estar lavrado e muito remexido, impossibilitando assim uma boa recolha de dados, obrigando inclusive a que o final do perfil 19 coincidisse com o início do perfil 17. No anexo 2 podem ser consultadas as fichas de campo associadas aos levantamentos da Área 2.



**Figura 21** – Área de investigação 2 (A2), composta pelo campo F. A amarelo estão os poços abertos durante a campanha de amostragem. Altitude de visualização: 259 m.

Na figura 22 encontram-se os ficheiros designados de F\_072 (antena 400 MHz) e F\_076 (antena 200 MHz) já processados e interpretados, correspondentes ao perfil 17. A amarelo encontram-se identificados dois poços, tendo o primeiro atingido uma profundidade de 1.80 m e o segundo apenas 0.80 m até ao substrato. A profundidade média desta área ronda os 1.04 m, atingindo os 2.38 m na zona mais profunda e os 0.40 m na zona mais superficial.



**Figura 22** – Radargramas correspondentes ao Campo F, Perfil 17, com a devida interpretação. Orientação: E - O. A vermelho observa-se o nível interpretado do substrato e a amarelo a localização e respetiva profundidade dos poços realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_076. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 200.58 m; B) Identificação F\_072. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 200.98 m.

Os resultados do processamento e da interpretação dos dados adquiridos na Área 2 podem ser observados na sua totalidade através da consulta do anexo 5.

No que toca aos cálculos efetuados para a determinação da tonelagem da Área 2, os resultados apontam para um valor de 675.408 toneladas. Estes resultados e os cálculos inerentes podem ser consultados através do Anexo 9.

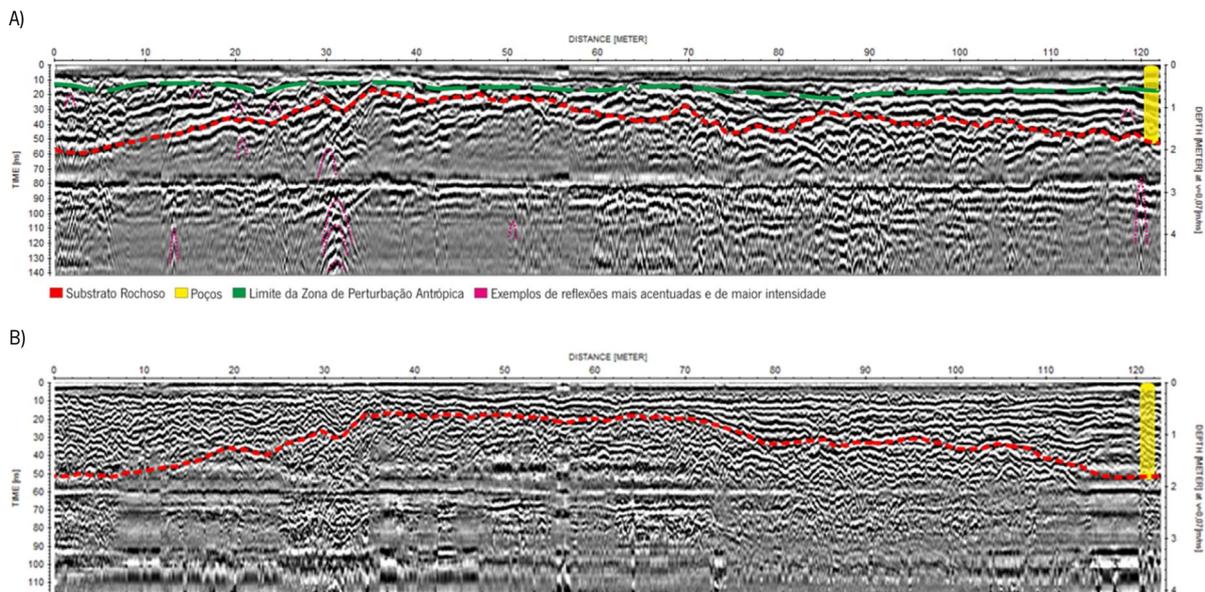
### 3.6.3. Local de Estudo – Área 3

O local de estudo indicado como Área 3 é composto pelo campo designado por G. À semelhança da Área 2, também aqui foram realizados 8 perfis, tendo metade sido adquiridos com a antena de 200 MHz e os restantes com a antena de 400 MHz. A configuração do campo em forma de “L” influenciou a grelha de levantamentos, como se pode observar na figura 23. Apesar do campo G apresentar as condições mais favoráveis de aquisição de dados, não foi possível começar o perfil 23 no extremo Este do terreno devido à plantação de milho lá existente. No anexo 3 podem ser consultadas as fichas de campo associadas aos levantamentos da Área 3.



**Figura 23** – Área de investigação 3 (A3), composta pelo campo G. A amarelo estão os poços abertos durante a campanha de amostragem. Altitude de visualização: 192 m.

Os ficheiros F\_080 (antena 200 MHz) e F\_084 (antena 400 MHz), correspondentes ao perfil 21, podem ser observados na figura 24, onde já se encontram processados e interpretados. Salienta-se o poço a amarelo no final do perfil, que atingiu uma profundidade de 1.8 m até ao substrato. A profundidade média desta área ronda os 1.22 m, atingindo os 2.00 m na zona mais profunda e os 0.40 m na zona mais superficial.



**Figura 24** – Radargramas correspondentes ao Campo G, Perfil 21, com a devida interpretação. Orientação: E - O. A vermelho observa-se o nível interpretado do substrato e a amarelo a localização e respetiva profundidade do poço realizado pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_080. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 122.14 m; B) Identificação F\_084. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 122.82 m.

Os resultados do processamento e da interpretação dos dados adquiridos na Área 3 podem ser observados na sua totalidade através da consulta do anexo 6.

Relativamente aos cálculos da tonelagem, os resultados para a Área 3 indicam um valor de 200,124 toneladas, correspondendo ao valor mais baixo quando comparado com as outras duas áreas estudadas.



## 4. Discussão dos resultados

O principal objetivo desta dissertação prende-se com a deteção e identificação do substrato rochoso através da utilização de equipamento de Georradar e software associado, estando o sucesso destes estudos dependentes da utilização de uma adequada metodologia de aquisição, prospeção e visualização de dados. O segundo objetivo proposto no âmbito desta dissertação compreende o cálculo do volume e da tonelagem das áreas estudadas.

A metodologia imposta desde a fase de prospeção até à fase de processamento e interpretação dos dados, permitiu avaliar a estratigrafia e determinar não só as volumetrias como as toneladas de cada área, sendo por isso recomendada a sua utilização em trabalhos futuros.

Os principais resultados associados a cada tema serão discutidos de seguida.

### 4.1. Visualização e interpretação dos dados

No decorrer desta tese de mestrado foram sendo levantadas várias questões relacionadas com a abordagem metodológica a adotar, nomeadamente sobre qual a sequência de processamento mais adequada e que metodologias de apresentação e visualização dos dados permitirão uma melhor interpretação do substrato rochoso e de outras estruturas presentes no solo.

A abordagem metodológica associada ao processamento do conjunto de dados obtidos com o Georradar e da subsequente aplicação dos diferentes filtros de frequência mostrou ser, em conjunto com os dados disponibilizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., eficiente na identificação de estruturas presentes no solo assim como na identificação do substrato rochoso. Lembro que se optou por não utilizar o filtro “fk migration (Stolt)”, uma vez que este introduzia alterações e artefactos nos dados. Isto ocorre uma vez que este filtro considera a mesma velocidade de deslocação das ondas de radar para todo o perfil, não levando em consideração as variações laterais que ocorrem no subsolo, o que provoca alterações nos dados.

A estimativa da profundidade do substrato rochoso parte da capacidade do utilizador em encontrar padrões que auxiliem nesta tarefa, o que pode ser desafiante no caso de existir uma grande atenuação do sinal ou muito ruído nos radargramas. Em grande medida os resultados obtidos derivaram essencialmente de três fatores, sendo eles: os dados relativos à profundidade dos poços; à análise da atenuação presente nos radargramas; e à convicção do utilizador na extrapolação e correlação dos dados. A atenuação presente nos radargramas foi um elemento tido em consideração, e após analisar todo o

conjunto de dados tornou-se aparente a possibilidade deste indicar a proximidade do substrato. Estas indicações parecem indiciar a alteração das características dos materiais do subsolo, nomeadamente a presença de granito greizenizado, bastante alterado nos primeiros 20 cm (em média), como observado aquando as escavações dos poços pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., não havendo ainda um limite bem definido para esta alteração, uma vez que vai diminuindo com a profundidade. A perda de sinal poderá também estar associada à presença de água no local, consequência de alguma precipitação ocorrida nas semanas anteriores. Admite-se assim alguma dificuldade na delimitação do substrato rochoso quando não estão disponíveis outras informações adicionais relevantes para a análise dos dados.

Ao analisar os radargramas correspondentes às duas antenas utilizadas para estes estudos, foi também notória a diferença da resolução entre ambas, onde a antena de 400 MHz gera um radargrama com maior resolução e uma imagem mais nítida e fidedigna do subsolo. Contudo noto que foi mais fácil, apesar de alguma perda de resolução, trabalhar sobre os radargramas gerados pela antena de 200 MHz, onde para além de terem atingido uma profundidade maior, não apresentam tanta interferência do sinal de radar na parte inferior do radargrama, o que ocorre em praticamente todos aqueles gerados pela antena de 400 MHz. Esta banda de interferência encontrada em grande parte dos radargramas gerados pela antena de 400 MHz (ex: Área 1 - F\_056 e F\_057; Área 2 - F\_072 e F\_073; Área 3 - F\_086 e F\_087) inviabiliza uma análise mais séria, principalmente quando o objetivo é delimitar o substrato rochoso, forçando assim a uma extrapolação baseada na análise dos radargramas gerados pela antena de 200 MHz.

Analisando os resultados é bem visível a grande variabilidade da profundidade do substrato, particularmente na Área 1 onde se observa, como já referido anteriormente, um desnível de 2.95 m em cerca de 70 m. Em média, podemos encontrar o substrato nesta área a uma profundidade de 2.54 m. Já na Área 2 e 3 esta variabilidade apresenta-se apenas pontualmente e é menos abrupta. Estas duas áreas estudadas exibem também um carácter mais uniforme, apresentando em média uma profundidade até ao substrato de 1.04 m (Área 2) e 1.22 m (Área 3). Esta ocorrência pode resultar do facto de estas duas áreas se localizarem em zonas mais periféricas do eluvião, junto aos “ramos” deste, onde a própria camada de cascalheira e consequentemente o substrato se encontra mais à superfície, como foi possível constatar no decorrer destes estudos.

Tendo em conta os dados fornecidos pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., relativos aos 50 poços que foram abertos é de se esperar uma grande variabilidade da profundidade do substrato ao

longo de todo o eluvião, prevendo-se uma situação semelhante à encontrada na Área 1, observando-se num curto espaço desníveis muito significativos e bastante abruptos. É portanto espectável serem encontradas zonas mais superficiais, na ordem dos 0.50 m, e zonas mais profundas que poderão atingir profundidades superiores a 5.50 m (*in* “Sampling and Evaluation of the Bejanca Eluviuns<sup>10</sup>). Não se pode descartar contudo o facto de existirem no eluvião zonas como a Área 2 e 3 onde esta variabilidade é menos acentuada e onde o substrato pode ser encontrado a uma profundidade menor e mais constante.

## 4.2. Cálculo do volume e tonelagem

O segundo objetivo proposto alcançar no âmbito desta dissertação foi o cálculo do volume de cada área estudada e a respetiva tonelagem. Considera-se que a metodologia adotada para o cálculo do volume, utilizando o *software* Surfer 11 foi adequada, tendo produzido resultados fiéis das áreas estudadas. O *software* calcula os resultados através de três métodos distintos, tendo gerado valores muito semelhantes, pelo qual foram utilizados valores médios para os cálculos posteriores. Note-se que a área com maior volume é a Área 1 com 753.229 m<sup>3</sup>, seguindo-se a Área 2 com 390.409 m<sup>3</sup>, no entanto este último valor encontra-se influenciado pela disposição dos levantamentos realizados no Campo F. Caso o Perfil 19 tivesse sido realizado paralelamente ao Perfil 17, seria espectável que o volume da Área 2 aumentasse para valores próximos dos obtidos na Área 1. Por sua vez o Campo G (Área 3) apresenta-se em último lugar com um volume de 115.679 m<sup>3</sup>, um valor esperado tendo em conta a área e a profundidade do substrato.

Relativamente aos dados da tonelagem, estes representam apenas uma aproximação valores reais, uma vez que foram utilizados para os cálculos valores teóricos para a porosidade, índice de saturação e densidade, não podendo por isso ser considerados fidedignos, servindo apenas para demonstração. Mesmo não tendo disponíveis os valores reais e ter sido impossível verifica-los devido a restrições financeiras e por motivos de trabalho, considerou-se importante mostrar que é possível calcular a tonelagem de cada área estudada e permitir assim ao leitor ficar com uma estimativa das toneladas de solo que terão de ser extraídos. Logo, temos como esperado em primeiro lugar a Área 1 com uma tonelagem total de 1303.087 toneladas, seguido pela Área 2 com 675.408 toneladas e por último a Área 3 com 200.124 toneladas. Assim para as três áreas estudadas temos um peso total de 2178.627 toneladas (valor teórico) de solo que terá de ser extraído, de modo a recuperar toda a fração fina de Sn e W deixada para trás no passado.

---

<sup>10</sup>Blackheath Resources – [http://www.blackheathresources.com/i/Maps/Bejanca\\_50pits.jpg](http://www.blackheathresources.com/i/Maps/Bejanca_50pits.jpg)



## 5. Considerações finais

### 5.1. Conclusões

O Georradar possui, aliado a *software* específico, a capacidade de produzir mapas e imagens tridimensionais do substrato rochoso, assim como de outras estruturas naturais. Para este efeito é necessário aplicar uma correta e apropriada metodologia prospectiva nos sítios a investigar, tendo em conta o contexto geológico (subsolo), as condições superficiais do terreno bem como as características do solo e das potenciais estruturas aí soterradas.

Esta dissertação é um contributo para o potencial ainda presente no antigo Campo Mineiro da Bejanca, nomeadamente no referido eluvião da Bejanca, e nesse sentido serão aqui apresentados os principais resultados e conclusões das metodologias adotadas nas três áreas sob investigação. Considera-se que esta dissertação cumpriu o objetivo inicialmente proposto, onde se pressupunha a deteção e identificação do substrato rochoso, com recurso ao Georradar, assim como o cálculo do volume e tonelagem de cada área estudada.

Durante os levantamentos geofísicos, a irregularidade da superfície de aquisição em grande parte dos terrenos afetou, de certa forma os resultados obtidos, principalmente na Área 2, ao introduzir ruído nos dados. A presença de água nos solos atenuou o sinal de radar, reduzindo assim a profundidade de penetração. Bem cedo se verificou o valor das fichas de campo, pois permitem reavivar a memória do que foi encontrado no momento de cada levantamento, fornecendo assim informação útil que poderia ficar esquecida no decorrer da redação desta dissertação.

No decurso deste trabalho verificou-se que a fase de visualização e análise dos resultados é uma etapa muito importante, pois delas depende o êxito da interpretação. O único *software* com funções de processamento disponível na Escola de Ciências, ReflexW, mostrou ser bastante eficaz no processamento dos dados, com um vasto leque de ferramentas e filtros, contribuindo assim para a qualidade final dos radargramas. É de salientar também o bom manual de instruções que acompanha este *software*, uma vez que não é propriamente um programa fácil de manipular de início. A visualização e análise dos radargramas, após o seu processamento, deverá ser a primeira etapa para uma boa interpretação. A existência de informações adicionais, como os disponibilizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda., desempenharam um papel relevante ao auxiliarem a análise e a interpretação dos dados.

Após a análise dos radargramas, e indicação nos próprios do substrato, foi possível com o auxílio do *software* Surfer 11, calcular o volume de cada área. Isto permitiu, com a utilização de valores teóricos, o cálculo da tonelagem de cada área estudada. Foram ainda criadas imagens tridimensionais destas áreas, que permitiram observar cada uma como um todo, constituindo assim um elemento vital para uma boa apreciação dos resultados.

Conclui-se que apesar de tanto a antena de 200 como a de 400 MHz apresentarem resultados satisfatórios, na aquisição de dados, a antena mais indicada para este tipo de trabalho será a de 400 MHz. Apesar dos dados adquiridos com a antena de 200 MHz apresentarem uma melhor qualidade de imagem no geral, a portabilidade da antena de 400 MHz e o facto de poder ser operada por um só operador fazem dela a melhor opção para este tipo de estudos, para além de oferecer uma melhor resolução. De forma a contornar a banda de interferência gerada na zona inferior dos radargramas produzidos pela antena de 400 MHz propõe-se a alteração da “janela de tempo”, nos parâmetros de aquisição, para por exemplo os 150 ns em vez dos 120 ns. Caso se verifiquem profundidades superiores aos 6 m porventura aconselhar-se-ia a utilização da antena de 200 MHz, apesar desta última ter de ser, preferencialmente, operada por duas pessoas.

## **5.2. Trabalhos futuros e recomendações**

As futuras linhas de investigação a desenvolver no seguimento desta dissertação terão obrigatoriamente de passar inicialmente pela confirmação dos resultados aqui apresentados, recorrendo naturalmente à abertura de alguns poços exploratórios. De forma a confirmar a profundidade do substrato, sugere-se que seja aberto pelo menos um poço entre os dois já existentes em cada área estudada.

A utilidade do Georradar, no âmbito desta dissertação, advém da sua capacidade de “mapear” o substrato. Dentro desta linha, propõe-se que o Georradar, integrado com sondagens pontuais realizados por uma retroescavadora ou um trado manual/mecânico, este último em zonas consideradas mais superficiais, seja utilizada como fonte primária de informação, a partir do qual se vão orientar as sondagens mecânicas e conceber os mapas tridimensionais das áreas a explorar e com isso estimar o volume e a tonelagem de cada área. A grande vantagem associada à utilização deste método, no eluvião da Bejanca, advém do potencial em quantificar, em antemão, as despesas necessárias no processo de extração do solo, despesas essas associadas, por exemplo, ao aluguer de maquinaria e a despesas com pessoal, permitindo assim às empresas um maior controlo financeiro e orçamental.

Deste modo, o Georradar poderá fornecer grande informação sobre os sítios a prospectar, podendo antever o que ocorrerá ao longo de todo o eluvião, possibilitando assim um melhor planeamento dos trabalhos. Com a “afinação” do método implementado será possível, com o tempo, recorrer cada vez menos a poços exploratórios, reduzindo as despesas com maquinaria, e possibilitando assim a alocação destes para outros locais. Para agilizar o processo dos levantamentos geofísicos será necessário criar, com antecedência, um plano de trabalho dedicado a cada área a explorar, onde deverá constar a orientação dos perfis a realizar. De igual modo, deverá ser certificado que as áreas estão devidamente limpas e desobstruídas, de forma a não dificultar a recolha de dados e facilitar o processo de extração. A recolha de dados deverá ocorrer preferencialmente durante os meses mais secos, de forma a evitar perdas maiores de sinal de radar, provocada pela atenuação da água presente no solo.



## 6. Bibliografia

- Adepelumi, A.A., Fayemi, O. & Akindulureni, J., 2013 – *Geophysical Mapping of Subsurface Stratigraphy Beneath a River Bed Using Ground Penetrating Radar: Lagos Nigeria Case Study*. Universal Journal of Geoscience, vol. 1(1), 2013, p. 10-19.
- Aguiar, J.C.M., 2005 – *Radar de Penetração no Solo (GPR): Aspectos Geofísicos e Geodésicos, Processamento e Análise em Pavimento Flexível*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia e Cartografia, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 128 p.
- Almeida, F., Silva, J., Duarte, M., Moura, R., Hermosilha, H., Rocha, A. & Gomes, C., 2006 – *Prospecção Geofísica e Geotécnica no Sítio de Implantação do Colombo's Resort, Porto Santo. Actas do 10º Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa. Vol. 1-21, p. 1-10.
- Alves, R.R., 2014 – *Localização de Dutos Enterrados com GPR Empregando Afastamentos Fonte-Receptor Constante*. Trabalho de Graduação. Departamento de Geologia e Geofísica Aplicada do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 86 p.
- Annan, A.P. & Davis, J.L., 1977 – *Impulse Radar Applied to Ice Thickness Measurements and Freshwater Bathymetry. Geological Survey of Canada, Report of Activities, 77-1B*, p. 117-124.
- Annan, A.P., 2003 – *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*. Sensors and Software Inc., 286 p.
- Annan, A.P., 2009 – *Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In: Ground penetrating radar theory and applications*. Edited by Harry M. Jol. Elsevier, p. 4-40.
- Azevedo, J., Mota, T., Oliveira, J. & Pereira, B., 2012 – *Using a Ground Penetrating Radar to Predict Upper Soil Moisture Levels. Agrotec*, 3, p. 92-97.
- Banks, W.S.L. & Johnson, C.D., 2011 – *Collection, Processing, and Interpretation of Ground-Penetrating Radar Data to Determine Sediment Thickness at Selected Locations in Deep Creek Lake, Garrett County, Maryland, 2007*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5223, 36 p.
- Baker, P.L., 1991 – *Response on Ground-penetrating Radar to Bounding Surfaces and Lithofacies Variations in Sand Barrier Sequences. Exploration Geophysics*, 22, 19-22.

- Baker, G.S., Jordan, T.E. & Talley, J., 2007 – An Introduction to Ground Penetrating Radar (GPR), *in* Baker, G.S., and Jol, H.M., eds., *Stratigraphic Analyses Using GPR: Geological Society of America, Special Paper 432*, p. 1-18.
- Billinger, S.M., 2009 – Utilising Ground Penetrating Radar for the Location of a Potential Human Burial Under Concrete. *Canadian Society Forensic Sciences Journal*, 42 (3), p. 200–209.
- Bristow, C.S. & Jol, H.M., 2003 – *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society, Special Publication N° 211, London, 330 p.
- Buderi, R., 1996 – *The Invention that Changed the World*. Simon & Schuster, New York, 352 p.
- Buderi, R., 1998 – *The Invention that Changed the World: How a Small Group of Radar Pioneers Won the Second World War and Launched a Technological Revolution*. Simon & Schuster, New York, 576 p.
- Butalia, R. S., Tuttle, J. W. & White, J. G. – Estimating Depth to Bedrock using Ground Penetrating Radar in the Carolina Slate Belt. *Duke Energy Convention Center, Exhibit Hall AB, Level 1, 2012. Poster Number 1600*.
- Cassidy, N.J., 2009a – Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. *In: Ground penetrating Radar Theory and Applications*. Edited by Harry M. Jol. Elsevier, p. 41-72.
- Cassidy, N.J., 2009b – Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. *In: Ground penetrating Radar Theory and Applications*. Edited by Harry M. Jol. Elsevier, p. 141-176.
- Castro, D.L. & Branco, R.M.G.C., 2003 – 4D Ground Penetrating Radar Monitoring of a Hydrocarbon Leakage Site in Fortaleza (Brazil) During its Remediation Process: a Case History. *Journal of Applied Geophysics*, 54, p. 127-144.
- Cavalheiro, A. & Carvalho, J., 2009a – *Prospecção por Geo-radar na Fábrica de Vidro do Côvo (Oliveira de Azeméis)*. Texto de Apoio do Workshop Prospecção Geofísica e Arqueológica da Fábrica de Vidro do Côvo, 16 p.
- Cavalheiro A. & Carvalho J., 2009b – *Reconhecimento Geofísico Pelo Método Electromagnético GPR, Foz – Porto, (Rua da Trinitária/Viela do Caminho Novo)*, relatório, FEUP-DEM/CIGAR.

- Clark, M.R., Gordon, M. & Forde, M.C., 2004 – Issues Over High-Speed Non-Invasive Monitoring of Railway Trackbed. *NDT & E International*, 37, p. 131-139.
- Clemeña, G., 1991 – Short-Pulse Radar Methods. *In: CRC Handbook on Non-destructive Testing of Concrete*. V.M. Malhotra & N. Carino (Ed.), *CRC press*, p. 253-274.
- Conyers L.B., 2004 – *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.
- Conyers, L., 2013 – *Ground-Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press. Third edition. 241 p.
- Costa, A.J.V., 2009 – *Utilização do Georadar na Caracterização de Pavimentos Rodoviários*. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 244 p.
- Cruz, P.J.S., Topczewski, L., Fernandes, F.M. & Lourenço, P. B., 2006 – Utilização do Radar de Prospecção Geotécnica na Localização das Bainhas de Pré-Esforço nas Pontes da Barra e de Lanheses. *4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, LNEC, Lisboa, 13 a 16 de Dezembro de 2006, 13 p.
- Cruz, N., Tareco, H., Rocha, R., Gonçalves, F., Vieira Simões, E. & Hipólito, A., 2008 – Caracterização de Maciços Cársicos com Base em Prospecção com Georadar. Um caso Prático. *11<sup>o</sup> Congresso Nacional de Geotecnia*. Coimbra.
- Daniels, D.J., 1995 – Fundamentals of Ground Penetrating Radar. *Proceedings of the Symposium on the application of geophysics of Engineering and Environmental Problems*, p. 62-141.
- Daniels, D.J., 2004 – *Ground Penetrating Radar – 2nd Edition*. Radar, Sonar, Navigation & Avionics, series 15, IEE, London, UK, 734p.
- Daniels, D.J., 2007 – *Ground Penetrating Radar*, 2nd Ed., IET, London, 2007.
- Davis, J.L. & Annan, A.P., 1989 – Ground-Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysics*, vol. 37, p. 531-551.
- Dérobot, X., Klysz, G., Balayssac, J.P. & Lataste, J.F., 2003 – Cover Concrete Evaluation by Electromagnetic and Electric Techniques – Case Study: Empalot Bridge. *Proceedings Structural faults and Repair, 10<sup>th</sup> International Conference and Exhibition*, London, UK, 11 p.

- Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M. & Dixon, N., 2008 – A Review of Pavement Assessment Using Ground Penetrating Radar (GPR). In: *Proceedings of the Twelfth International Conference on Ground-Penetrating Radar*. Birmingham, UK, 10 p.
- Fernandes, F.M., 2006 – *Evaluation of Two Novel NDT Techniques: Microdrilling of Clay Bricks and Ground Penetrating Radar in Masonry*. Tese de Doutoramento. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 256 p.
- Fernandes, F.M. & Lourenço, P.B., 2007 – Aplicações do Georadar na Reabilitação e Detecção de Anomalias. *Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional 17 a 19 de Dezembro*, Coimbra, 11 p.
- Fernandes, F., Pereira, M., Gomes Correia, A., Caldeira, L. & Lourenço, P., 2008 – Assessment of Layer Thickness and Uniformity in Railway Embankments with Ground Penetrating Radar. *1<sup>st</sup> International Conference on Transportation Geotechnics*. Nottingham, Reino Unido, 5 p.
- Fernandes, F.M., Lourenço, P.B. & Cruz, P.J.S., 2010 – Possibilidades do Radar de Prospecção Geotécnica em Estruturas e Aplicações em Portugal. *Ingenium*, série II, no. 120, novembro/dezembro 2010, p. 84-90.
- Ferreira, N., Godinho, M.M., Neves, L., Pereira, A., Sequeira, A., Castro, P. & Santos, T.B., 2010 – *Notícia Explicativa da Folha 17-A Viseu*. Unidade de Geologia e Cartografia Geológica. Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Lisboa 2010, 66 p.
- Filipe, S. & Morgado, P., 2011 - Using GPR as a Methodology of Recording a Heritage Safeguard: Case Studies at the University of Coimbra. *Communication on the "3º seminário internacional ArchC\_3D", 31<sup>st</sup> January, Faculty of Architecture – Technical University of Lisbon*, CD-Rom, 10 p.
- Fisher, S.C., Stewart, R.R. & Jol, H.M., 1992 – Processing Ground Penetrating Radar (GPR) Data. *CREWES Research Report*, vol. 4, 1992, p. 11-22.
- Forde, M.C., 2004 – Ground Penetrating Radar. In: *Proc., Introduction to Non-destructive Evaluation Technologies for Bridges Conference*, Transportation Research Board, 20 p.
- Francke, J. & Utsi, V., 2009 – Advances in Long-Range GPR Systems and their Applications to Mineral Exploration, Geotechnical and Static Correction Problems. *First Break*, vol. 27, no. 7, p. 85-93.

- Franco, D.A.L., 2010 – *Avaliação das Potencialidades do Georradar em Engenharia Civil*. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 151 p.
- Franco, D., Cardoso, C., Machado, A. & Gonçalves R., 2012 – Application of the GPR in Real-life Situations in Geotechnical Engineering. *Proceedings of the 4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC'4)*, Brazil, Digital support.
- Freeland, R. S., Yoder, R. E. & Ammons, J. T., 1998 – Mapping Shallow Underground Features that Influence Site-Specific Agricultural Production. *Journal of Applied Geophysics*, 40, p. 19-27.
- Fullagar, P.K., & Livleybrooks, D., 1994 – Trial of Tunnel Radar for Cavity and Ore Detection in the Sudbury Mining Camp, Ontario. *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada, p. 883 – 894.
- Gonçalves L., Sampaio H.A, Alves M.I.C. & Bettencourt A.M.S., 2008 – Ground Penetrating Radar Mapping in Rescue Archaeology. A study from Pego Late Bronze Age Settlement, Braga (NW Portugal). *In Abstracts of Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Birmingham, UK, 4 p.
- Gonçalves, L.M.B., 2013 – *Estudo Geoarqueológico com Georadar. Aplicação aos Contextos Arqueológicos da Pré-História Recente à Proto-História do NW de Portugal*. Tese de Doutoramento. Escola de Ciências, Universidade do Minho, 258 p.
- Gonçalves, H.H.S., Marinho, F.A.M. & Futai, M.M., 2014 – *Mecânica dos Solos e Fundações*. Notas de aulas revisadas, 2014. PEF 522, 143 p.
- Hülsenbeck & Co., 1926 – *German patent 489 434*. *In: Conyers L.B. 2004 – Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.
- Jol, H.M. & Bristow, C.S., 2003 – GPR in Sediments: Advice on Data Collection, Basic Processing and Interpretation, a Good Practice Guide. *In: Ground Penetrating Radar in sediments*. Jol, H.M. & Bristow, C.S., (Editors). Geological Society Special Publication, n.º211, The Geological Society, London, p. 9-27.
- Jol, H.M., 2009 – *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, 600 p.

- Knödel, K., Lange, G. & Voigt, H.J., 2007 – *Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer, Berlin, BGR, 1357 p.
- Lasmar, D. I., 2012 – *Desenvolvimento de um Posicionador Automatizado com Aplicação em Medidas Acústicas*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais, 150 p.
- Leucci, G., 2012 – Ground Penetrating Radar: A Useful Tool for Shallow Subsurface Stratigraphy Characterization. *In: Stratigraphic Analysis of Layered Deposits*, Edited by Dr. Ömer Elitok, InTech. Available from: <http://www.intechopen.com/books/stratigraphic-analysis-of-layered-deposits/groundpenetrating-radar-a-useful-tool-for-shallow-subsurface-stratigraphy-characterization>, p. 61-86.
- Lima, A. & Santos, P., 2012 – Spatial Analysis of Geological Structures Favorability for the Occurrence of Sn and W Mineral Deposits in Bejanca Mine (Viseu - Portugal). *European Mineralogical Conference*, vol. 1, 2012, 1 p.
- Lourenço V., Caldeira, B., Rocha, J.P., Bezzeghoud, M. & Borges, J.F., 2009 – Utilização do Radar de Penetração nos Solos (GPR) na Detecção de Estruturas no Âmbito das Ciências Forenses. *Actas do IV Encontro de Pós-graduação em Ciências Físicas e da Terra da Universidade de Évora*, Universidade de Évora, Évora (18-19 de Setembro de 2009), p. 47-48.
- Lorenzo, H., Rial, F.I., Arias P. & Armesto J., 2009 – Fighting Against Coastal Oil Spill Pollution by Means of Ground-Based Radar. *Journal of Coastal Research*, 56, p. 841 – 845.
- Lynton, E.D., 1953 – *Preliminary Report on the Couto Mineiro da Bejanca, Viseu, Portugal*. Consulting Mining Engineer, Glendale, California, July 7, 1953.
- Manu, E., Preko, K. & Wemegah, D.D., 2013 – Application of Ground Penetrating Radar in Delineating Zones of Gold Mineralization at the Subenso-North Concession of Newmont Ghana Gold Limited. *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, 5, May 2013, 11 p.
- Matias, S., Moura, R., Gomes, P. & Teixeira, R., 1995 – Geophysical Investigations Inside the "Casa do Infante", Oporto, Portugal. *Proceedings from the 1st meeting EEGS*, Turim, Itália, p. 493-494.

- Matias, S., Marques da Silva, M., Cabral, B., & Tareco, H., 2000 – An EM and GPR Survey to Study and Monitor Aquifers Contamination by a Landfill. *European Association of Geoscientists and Engineers, Extended Abstracts*. Glasgow, vol. 2, 106 p.
- Mccavitt, N. & Forde, M.C., 1993 – Numerical Simulation of Impulse Radar Through Masonry. *Proceedings 5th International Conference on Structural Faults and Repair*, Edinburgh, Scotland, p. 289-295.
- McCuaig, S.J. & Ricketts, M.J., 2004 – *Ground-Penetrating Radar: A Tool for Delineating Aggregate-Resource Deposits*. Current Research, Newfoundland Department of Mines and Energy Geological Survey, Report 04-1, p. 107-115.
- Melo, M.S., 2007 – *Geofísica Aplicada à Arqueologia: Investigação no Sítio Histórico Engenho Murutucu, em Belém, Pará*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 100 p.
- Milsom, J., 2003 – *Field Geophysics – The Geological Field Guide Series*. University College London. John Willey & Sons, Ltd. Third Edition, 232 p.
- Moura, R.M. & Matias, M.J.S., 1999 – Radar de Penetração (GPR: Ground Penetrating Radar) Aplicado ao Estudo de Fracturação em Mármore do Anticlinal de Extremoz (Alentejo-Portugal). *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, vol. 86, p. 289-300.
- Neal, A., 2004 – Ground-Penetrating Radar and its Use in Sedimentology: Principles, Problems and Progress. *Earth-Science Reviews*, 66, p. 261–330.
- Nascimento, W.G., 2009 – *Investigação Geofísica Ambiental e Forense nos Cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém - PA)*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 153 p.
- Nobes, D.C., 1999 – Geophysical Survey of Burial Sites: A Case Study of the Oaro Urupa. *Geophysics*, vol. 64 (2), p. 357-367.
- Nováková, E., Karous, M., Zajicek, A. & Karousová, M. – Evaluation of Ground Penetrating Radar and Vertical Electrical Sounding Methods to Determine Soil Horizons and Bedrock at the Locality Dehtáře. *Soil & Water Res.*, 8, 2013 (3), p. 105-112.

- Olhoeft, G.R., 1998 – Electrical, Magnetic and Geomagnetic Properties that Determine Ground Penetrating Radar Performance. *Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 98)*, USA, p. 477-483.
- Olhoeft, G.R., 2000 – Maximizing the Information Return from Ground Penetrating Radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 6, p. 175-187.
- Olson, C.G. & Doolittle, J.A., 1985 – Geophysical Techniques for Reconnaissance Investigation of Soils and Superficial Deposits in Mountainous Terrain. *Soil Science Society of America Journal* 49, p. 1490-1498.
- Padaratz, I.J. & Forde, M.C., 1995 – A theoretical Evaluation of Impulse Radar Wave Propagation Through Concrete. *Non-destructive Testing and Evaluation*, vol. 12, p. 9-32.
- Patterson, J. & Cook, F.A., 2002 – Successful Application of Ground Penetrating Radar in the Exploration of Gem Tourmaline Pegmatites of Southern California. *Geophysical Prospecting*, vol. 50, 2, March 2002, p. 107-117.
- Pîrnău, R.G., Pintilie, A.M., Bodi, G., Asăndulesei, A. & Niacșu, L., 2014 – Ground Penetrating Radar as Noninvasive Method Used in Soil Science and Archaeology. *Soil Forming Factors and Processes from the Temperate Zone*, vol. 13, no. 1, p. 15-31.
- Ramos, R., Freitas, M.C., Bristow, C., Andrade, C., Hermosilha, H., Grangeia, C. & Senos Matias, M., 2011 – Sedimentary Architecture of the Santo André Transverse Dunes (Portugal) Interpreted from Ground-Penetrating Radar. *Journal of Coastal Research, SI 57 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium)*, Szczecin, Poland, p. 303-307.
- Reynolds, J.M., 1997 – *An introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, Chichester, 796 p.
- Robinson, M., Bristow, C., McKinley, J. & Ruffell, A., 2013 – *Ground Penetrating Radar*. British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques, Part 1, Sec. 5.5 (2013), 26 p.
- Rodrigues, F., 1991 – *Aplicação de Métodos Sísmicos e Electromagnéticos (radar) em Engenharia*. LNEC, Lisboa.

- Rodrigues, F., Oliveira, M. & Coelho, M., 1991 – Radar de Penetração. Aplicações em Geotecnia. 1º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.
- Roth K., Schulin R., Flühler H. & Attinger W., 1990 – *Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach*. Water Resources Research, 26, p. 2267-2273.
- Sandmeir, K.J., 2014 – ReflexW, Version 7.5 – Windows™ 9x/NT/2000/XP/7/8 - *Program for the Processing of Seismic, Acoustic or Electromagnetic Reflection, Refraction and Transmission Data. Program Manual*. Germany, 598 p.
- Serway, R.A., 1996 – *Física 3: Electricidade, Magnetismo e Óptica*. 3ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 428 p.
- Singh, N.K., 2007 – Ground Penetrating Radar (GPR) ‘Mineral Base Profiling and Orebody Optimization’. *The 6th International Heavy Minerals Conference ‘Back to Basics’, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, p. 179-182.
- Sousa, R., Soares, M., Oliveira, M. & Pereira, C., 2000 - Análise do Comportamento Estrutural do Túnel Rodoviário sob a Pista do Aeroporto Sá Carneiro. 6º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.
- Stern, W., 1929 – Versuch Einer Electro-dynamischen Dickenmessung von Gletschereis. *Beitrage zur Geophysics*, 33: 209-225. In: Conyers L.B. 2004 – *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.
- Taffe, A. & Maierhofer, C., 2003 – Guidelines for NDT Methods in Civil Engineering. In: *Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, 6p. CD-ROM.
- Topczewski, L.K., 2007 – *Improvement and Application of Ground Penetrating Radar Non-Destructive Technique for the Concrete Bridge Inspection*. Tese de Doutoramento. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 145 p.
- Topczewski, L., Fernandes, F.M., Cruz, P.J.S. & Lourenço, P.B., 2007 – Practical Implications of GPR Investigation Using 3D Data Reconstruction and Transmission Tomography. *Journal of Building Appraisal*, vol. 3(1), 2007, p. 59-76.

- Ulaby, F., 2001 – *Fundamentals of Applied Electromagnetics*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 435 p.
- Weise, F. & Schaurich, D., 2003 – A Novel Combination of NDT Methods for Assessment of Moisture Conditions in Structural Members – a Case Study of the Berlin Zeughaus. *Proceedings International Symposium Non-destructive testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, 9 p., CD-ROM.
- White, H., Plessis, A., Noble, K. & Treloar, M., 1999 – *Routine Application of Radar in Underground Mining Applications*. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 1999, p. 197-206.
- White, R., 2009 – *Understanding Vineyard Soils*. Oxford University Press. 240 p.
- Wilkins, D. E. & Clement, W. P., 2007 – Paleolake Shoreline Sequencing Using Ground Penetrating Radar: Lake Alvord, Oregon, and Nevada. *In: Baker, G.S. & Jol, H.M., eds, Stratigraphic Analysis using GPR*. Geological Society of America, Special Paper 432, p. 103-110.
- Woodward, J., Ashworth, P.J., Best, J.L., Smith, G.H.S. & Simpson, C.J., 2003 – The Use and Application of GPR in Sandy Fluvial Environments: Methodological Considerations. *In: Ground Penetrating Radar in sediments*. Jol, H.M. & Bristow, C.S., (Editors). *Geological Society Special Publication*, n.º211, The Geological Society, London, p. 127-142.
- Yilmaz, O., 1987 – Seismic Data Processing. Investigations. *In Geophysics*, vol. 2. Soc. Explor. Geophys., Tulsa.

## Webgrafia

- Blackheath Resources – “*Sampling and Evaluation of the Bejanca Eluviuns*”. <[http://www.blackheathresources.com/i/Maps/Bejanca\\_50pits.jpg](http://www.blackheathresources.com/i/Maps/Bejanca_50pits.jpg)> (20 Fevereiro, 2016).
- GSSI – “*About GSSI*.” <<http://www.geophysical.com/aboutgssi.htm>> (25 Abril, 2016).
- IDS – “*About the GeoRadar Division*.” <<https://www.idscorporation.com/georadar/about-the-georadar-division>> (25 Abril, 2016).
- Luis, J., 2005 – *Georadar*. Univer. do Algarve <[http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas\\_cap5.pdf](http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas_cap5.pdf)>, 4 p (6 Janeiro, 2016).

## **Cartografia Impressa**

*Carta Militar de Portugal*, Série M888, 1/25.000, Instituto Geográfico do Exército, Lisboa:

Folha 177 – Vouzela, Edição 3, 1999.

*Carta Geológica de Portugal*, Série M782, 1/50.000, Instituto Geográfico do Exército, Lisboa:

Folha 17A – Viseu, Edição 1, Serviços Geológicos de Portugal, 1971. Atualização parcial em 2008.

# Anexo 1

Fichas de Campo Área 1  
(Campo A a E)

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 1	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_A				
Survey ID	F_040   F_056				
Coordenadas	Início	581294.10E/4505798.68N	Fim	581295.97E/4505893.84N	
	Direção	S - N	Comprimento (m)	93.74   93.78	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Pousio				
Surveyor	Prof. Luis Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil começa no caminho de terra batida, e entra num campo parcialmente em pousio. Vegetação rasteira, contudo afetou o acoplamento das antenas ao solo. Primeiro poço a 1.5 m à esquerda do perfil entre os 18-22 m. Atenção à presença de um monte de estrume perto do 1º poço, perfil passa ao lado. Segundo poço a 1 m à direita do perfil entre os 90-92 m.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 2	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_A				
Survey ID	F_041   F_057				
Coordenadas	Início	581313.00E/4505890.00N	Fim	581284.15E/4505893.43N	
	Direção	E - O	Comprimento (m)	29.98   29.78	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Bosque, Pousio e Cultivo				
Surveyor	Prof. Luis Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
O perfil começa em terreno de bosque, passando perpendicularmente ao Perfil 1 e sobre o segundo poço. Ligeiro desvio do percurso marcado devido ao terreno. Intersecta o poço aos 11 m.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 3	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_A				
Survey ID	F_042   F_058				
Coordenadas	Início	581285.13E/4505895.95N		Fim	581278.09E/4505809.51N
	Direção	N - S		Comprimento (m)	87.20   87.00
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
O Perfil 3 realiza-se paralelamente ao Perfil 1, contudo no sentido contrário. Perfil realizado sobre um campo de cultivo de abóboras, o que dificultou o levantamento, afetando o correto acoplamento das antenas ao solo.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 4	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_A				
Survey ID	F_043   F_059				
Coordenadas	Início	581278.00E/4505823.79N		Fim	581295.74E/4505821.83N
	Direção	O - E		Comprimento (m)	18.00   18.5
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo e Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
O Perfil 3 realiza-se no sentido contrário ao Perfil 2, e perpendicularmente aos Perfis 1 e 3, passando por cima do primeiro poço por volta dos 13 m.					



**Imagem 1.** Vista do início do Campo A. Vista S-N.



**Imagem 2.** Vista do final do Campo A. Vista N-S.

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 5	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_B				
Survey ID	F_044   F_060				
Coordenadas	Início	581257.50E/4505810.88N		Fim	581267.61E/4505900.48N
	Direção	S - N	Comprimento (m)		90.20   89.50
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
O Perfil 5 foi realizado paralelamente aos Perfis 1 e 3 (com a mesma direção do Perfil 1), num campo onde recentemente foi ceifado o milho. Os restos das hastes e a vegetação dificultaram o "perfeito" acoplamento das antenas ao solo.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 6	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_B				
Survey ID	F_045   F_061				
Coordenadas	Início	581283.61E/4505891.64N		Fim	581265.12E/4505893.67N
	Direção	E - O	Comprimento (m)		15.70   16.54
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Topo do terreno B. Perfil perpendicular ao Perfil 5, e com a mesma direção do Perfil 2. Os restos das hastes e a vegetação dificultaram o acoplamento das antenas ao solo.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 7	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_B				
Survey ID	F_046   F_062				
Coordenadas	Início	581257.15E/4505824.09N		Fim	581277.26E/4505822.07N
	Direção	O - E	Comprimento (m)	16.66   16.78	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 5. O levantamento foi dificultado devido à vegetação e aos restos das hastas encontradas no terreno.					



Imagem 3. Vista do início do Campo B. Vista S-N.



Imagem 4. Vista do final do Campo B. Vista N-S.

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 8	
<i>Survey Details</i>					
Survey Name	C_C				
Survey ID	F_047   F_063				
Coordenadas	Início	581244.57E/4505816.32N		Fim	581254.99E/4505900.72N
	Direção	S - N		Comprimento (m)	86.10   85.74
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<i>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</i>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
Nº Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dielétrica	16.15				
<i>Observações</i>					
Perfil paralelo e no mesmo sentido do Perfil 1. Começa sobre o caminho de terra batida. Primeiros metros do terreno encontram-se desimpedidos de hastes, contudo mais ou menos a meio do levantamento aparecem de forma espalhada, não interferindo muito com o equipamento.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 9	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_C				
Survey ID	F_048   F_064				
Coordenadas	Início	581264.35E/4505895.53N		Fim	581254.60E/4505896.66N
	Direção	E - O		Comprimento (m)	9.62   9.98
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 8. Vegetação rasteira, com alguns altos, mas de forma geral um bom acoplamento das antenas.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 10	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_C				
Survey ID	F_049   F_065				
Coordenadas	Início	581244.97E/4505830.29N		Fim	581256.97E/4505829.06N
	Direção	O - E		Comprimento (m)	10.42   10.50
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 8. Vegetação rasteira, com algumas hastes na parte final do levantamento, mas de forma geral um bom acoplamento das antenas.					



**Imagem 5.** Vista do início do Campo C. Vista S-N.



**Imagem 6.** Vista do final do Campo C. Vista N-S.

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 11	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_D				
Survey ID	F_050   F_066				
Coordenadas	Início	581221.81E/4505823.18N		Fim	581232.64E/4505905.43N
	Direção	S - N	Comprimento (m)		85.30   85.54
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil paralelo ao Perfil 1. Campo D ofereceu o melhor acoplamento da antena ao solo neste primeiro dia de campo.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 12	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_D				
Survey ID	F_051   F_067				
Coordenadas	Início	581254.00E/4505896.00N		Fim	581229.62E/4505898.63N
	Direção	E - O	Comprimento (m)		22.70
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 11.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 13	
<i>Survey Details</i>					
Survey Name	C_D				
Survey ID	F_052   F_068				
Coordenadas	Início	581223.14E/4505840.11N		Fim	581245.77E/4505837.64N
	Direção	O - E	Comprimento (m)	21.62   21.38	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<i>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</i>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dielétrica	16.15				
<i>Observações</i>					
Perfil perpendicular ao Perfil 11.					



Imagem 7. Vista do início do Campo D. Vista S-N.



Imagem 8. Vista do final do Campo D. Vista N-S.

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 14	
<i>Survey Details</i>					
Survey Name	C_E				
Survey ID	F_053   F_069				
Coordenadas	Início	581203.55E/4505826.66N		Fim	581213.97E/4505899.00N
	Direção	S - N		Comprimento (m)	76.26   76.70
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<i>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</i>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<i>Observações</i>					
Perfil paralelo ao Perfil 1. Devido às condições do terreno foi necessário um cuidado redobrado para o melhor acoplamento possível da antena ao solo. Vegetação alta e hastes do milho.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 15	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_E				
Survey ID	F_054   F_070				
Coordenadas	Início	581228.68E/4505894.09N		Fim	581212.48E/4505895.81N
	Direção	E - O		Comprimento (m)	15.10   14.70
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 14. Vegetação alta e hastes do milho.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 21/10/2015		IDn° 16	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_E				
Survey ID	F_055   F_071				
Coordenadas	Início	581204.86E/4505846.86N		Fim	581223.00E/4505845.00N
	Direção	O - E		Comprimento (m)	16.82   16.94
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Húmido e frio da parte da manhã, com um ligeiro aumento da temperatura da parte da tarde. Períodos de chuva alguns dias antes.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 14. Vegetação alta e hastes do milho.					



**Imagem 9.** Vista do início do Campo E. Vista S-N.



**Imagem 10.** Vista do final do Campo E. Vista N-S.

# Anexo 2

Fichas de Campo Área 2  
(Campo F)

Local: Queirã, Vouzela		Data: 18/11/2015		IDn° 17	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_F				
Survey ID	F_072   F_076				
Coordenadas	Início	580686.00E/4506069.00N		Fim	580490.00E/4506030.00N
	Direção	E - O	Comprimento (m)	200.58   200.98	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Temperatura amena. Céu azul pouco nublado. Cerca de uma semana e meia sem períodos de chuva.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo – Pousio; Parcialmente lavrado				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	400 MHz   200 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Terreno algo irregular, com algumas depressões no solo espalhados pelo campo. Acoplamento da antena ao solo pouco afetada no decurso do levantamento. Vegetação rasteira. Primeiro poço por volta dos 10 m, a 1.80 m à esquerda. Segundo poço por volta dos 182 m, a 1.70 m à esquerda.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 18/11/2015		IDn° 18	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_F				
Survey ID	F_073   F_077				
Coordenadas	Início	580509.00E/4506029.00N		Fim	580500.00E/4506077.00N
	Direção	S - N	Comprimento (m)	48.78   48.70	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Temperatura amena. Céu azul pouco nublado. Cerca de uma semana e meia sem períodos de chuva.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo – Pousio; Parcialmente lavrado				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	400 MHz   200 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 17. Terreno com algumas depressões no solo espalhados pelo campo. Vegetação rasteira. Últimos 5 m do perfil foram realizados sobre terreno lavrado, muito irregular, o que afetou o acoplamento da antena ao solo. Segundo poço intersetado aos 3.25 m.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 18/11/2015		IDn° 19	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_F				
Survey ID	F_074   F_078				
Coordenadas	Início	580478.00E/4506047.00N		Fim	580490.00E/4506030.00N
	Direção	O - E	Comprimento (m)	212.38   212.00	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Temperatura amena. Céu azul pouco nublado. Cerca de uma semana e meia sem períodos de chuva.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio; Parcialmente lavrado				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	400 MHz   200 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Não foi possível realizar este levantamento paralelamente ao Perfil 17 devido a parte do terreno (faixa O - E no limite N do terreno) estar lavrado, e de não proporcionar boas condições de aquisição de dados, afetando grandemente o acoplamento da antena ao solo. Início do perfil 17 corresponde ao final do Perfil 19.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 18/11/2015		IDn° 20	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_F				
Survey ID	F_075   F_079				
Coordenadas	Início	580652.00E/4506049.00N		Fim	580646.00E/4506079.00N
	Direção	S - N	Comprimento (m)	29.00   28.90	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Temperatura amena. Céu azul pouco nublado. Cerca de uma semana e meia sem períodos de chuva.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio; Parcialmente lavrado				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	400 MHz   200 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 17. Últimos 4 m do perfil foram realizados sobre terreno lavrado, muito irregular, o que afetou o acoplamento da antena ao solo.					



**Imagem 11.** Vista do início do Campo F. Vista E-O.



**Imagem 12.** Vista do final do Campo F. Vista O-E.

# Anexo 3

Fichas de Campo Área 3  
(Campo G)

Local: Queirã, Vouzela		Data: 18/11/2015		IDn° 21	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_G				
Survey ID	F_080   F_084				
Coordenadas	Início	580230.00E/4505837.00N		Fim	580111.00E/4505817.00N
	Direção	E - O	Comprimento (m)	122.14   122.82	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Temperatura amena. Céu azul pouco nublado. Cerca de uma semana e meia sem períodos de chuva.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Terreno relativamente plano, com vegetação baixa. Bom acoplamento da antena ao solo. Intersecta o segundo poço no final (121 m) do perfil a 0.5 m à direita.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 18/11/2015		IDn° 22	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_G				
Survey ID	F_081   F_085				
Coordenadas	Início	580128.00E/4505817.00N		Fim	580126.00E/4505833.00N
	Direção	S - N	Comprimento (m)	16.18   16.42	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Temperatura amena. Céu azul pouco nublado. Cerca de uma semana e meia sem períodos de chuva.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil perpendicular ao Perfil 21. A partir dos 4 m foi necessário abrir caminho pelo milho para completar o perfil.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 18/11/2015		IDn° 23	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_G				
Survey ID	F_082   F_086				
Coordenadas	Início	580125.00E/4505828.00N		Fim	580223.00E/4505842.00N
	Direção	O - E	Comprimento (m)	100.94   100.70	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Temperatura amena. Céu azul pouco nublado. Cerca de uma semana e meia sem períodos de chuva.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil paralelo ao Perfil 21. Perfil não foi iniciado na extremidade W devido à presença de uma plantação de milho. Com a autorização do proprietário foi possível realizar os primeiros 17 m do levantamento sobre uma plantação de milho. O acoplamento da antena ao solo nos primeiros 17 m foi dificultada pela presença do milho. Primeiro poço por volta dos 44 m, a 2 m à direita.					

Local: Queirã, Vouzela		Data: 18/11/2015		IDn° 24	
<b>Survey Details</b>					
Survey Name	C_G				
Survey ID	F_083   F_087				
Coordenadas	Início	580216.00E/4505831.00N		Fim	580207.00E/4505872.00N
	Direção	S - N	Comprimento (m)	39.46	
Geologia	Esta região é composta por massas de granito greizenizado, e ainda granito porfiróide de duas micas, com domínio da biotite. Há ainda veios de quartzo que cortam o granito greizenizado em diferentes direções (Lima e Santos, 2012).				
Clima	Temperatura amena. Céu azul pouco nublado. Cerca de uma semana e meia sem períodos de chuva.				
Solo	Húmido				
Utilização do Solo	Cultivo - Pousio				
Surveyor	Prof. Luís Gonçalves e Tomaz Assunção				
<b>Equipamento e Parâmetros Geofísicos</b>					
Survey Type	Georradar (GPR)				
Sistema	TerraSIRch SIR System-3000				
Antena	200 MHz   400 MHz				
Aquisição de Dados	Distância				
Taxa de Amostragem	60				
Intervalo entre Traços	2 cm				
N° Amostras por Traço	1024				
Tamanho da Amostra	16 bit				
Janela de Tempo	150 nS   120 nS				
Dialétrica	16.15				
<b>Observações</b>					
Perfil paralelo ao Perfil 22 e perpendicular ao Perfil 21 e 23.					



**Imagem 13.** Vista do início do Campo G. Vista E-O.

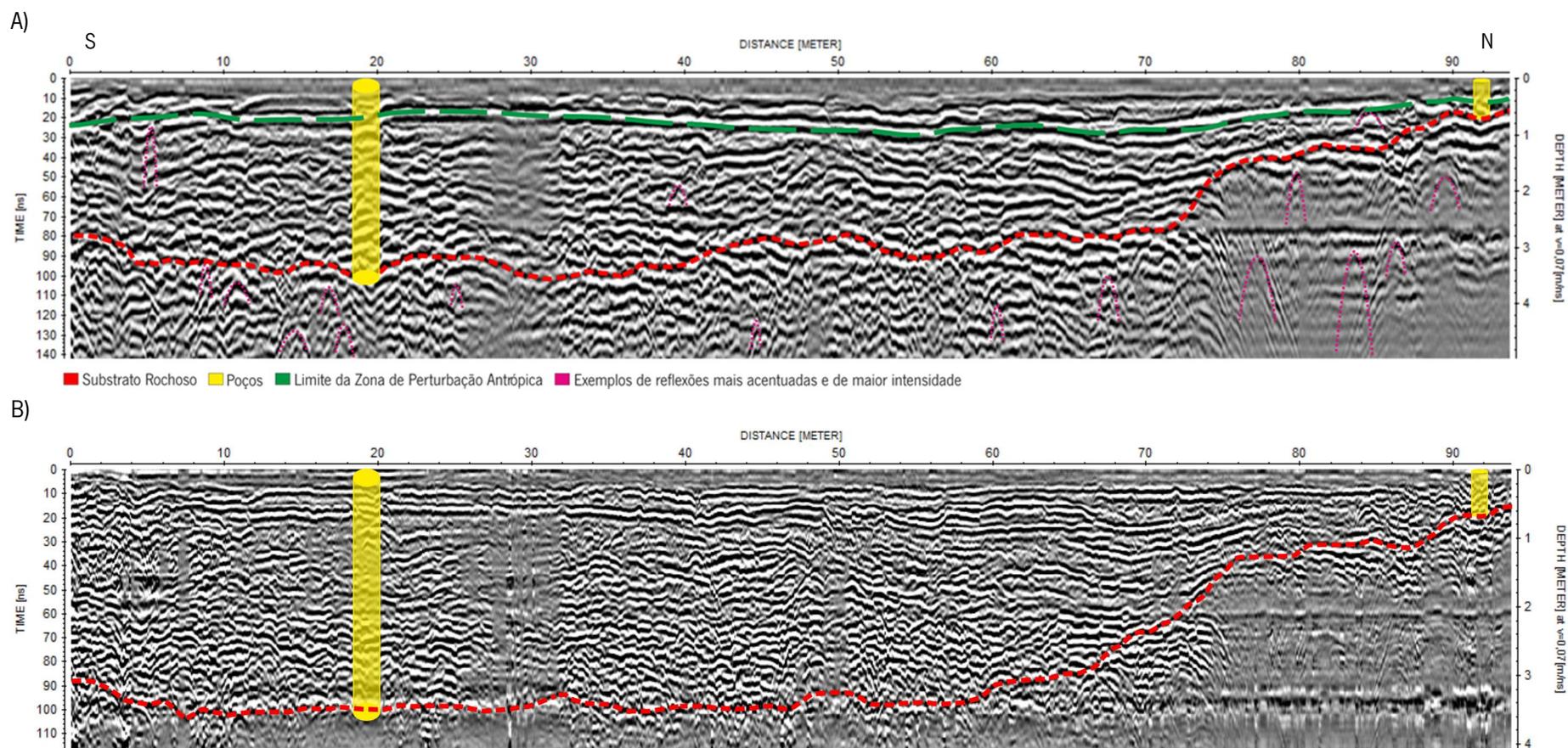


**Imagem 14.** Vista do final do Campo G. Vista O-E.

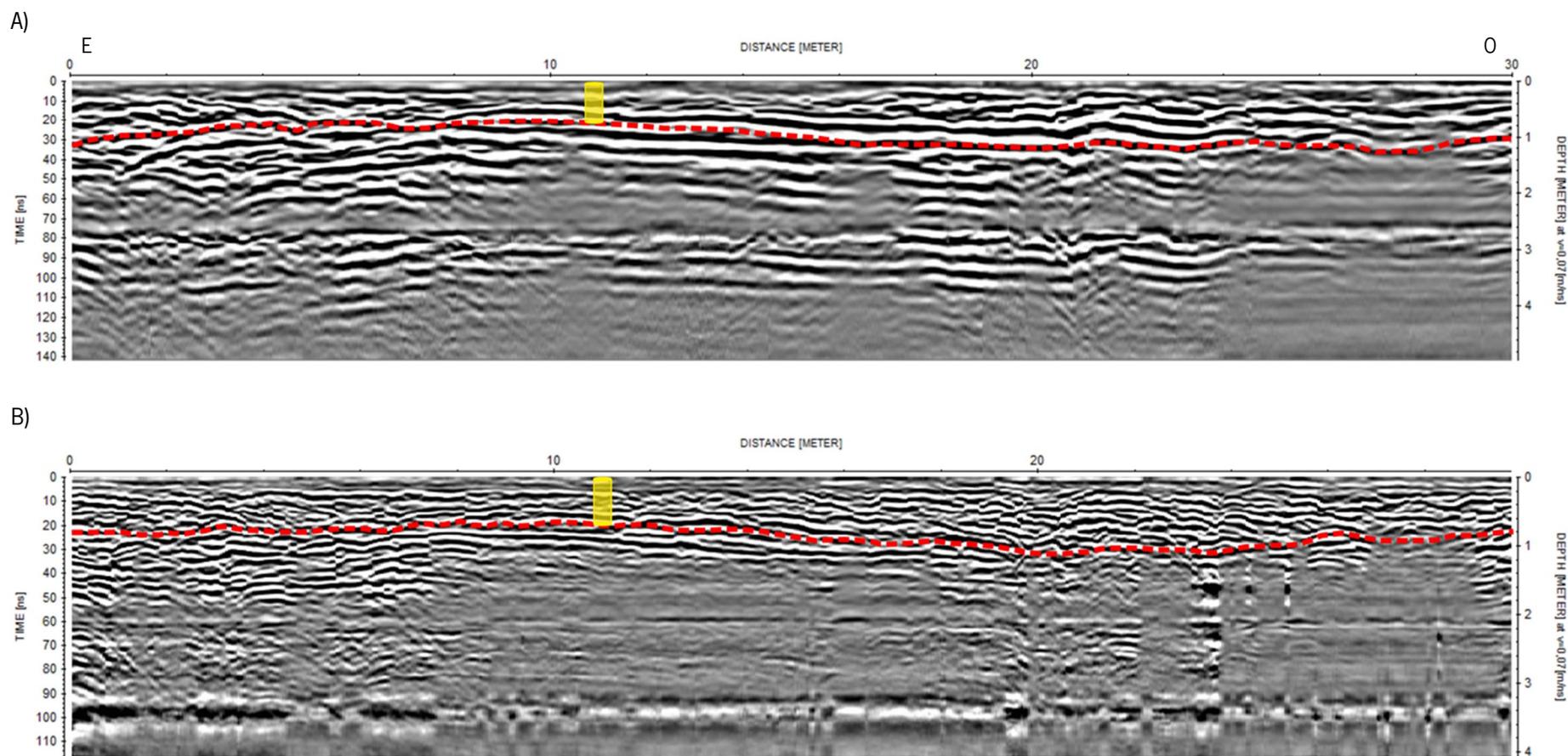
# Anexo 4

Radargramas – Área 1

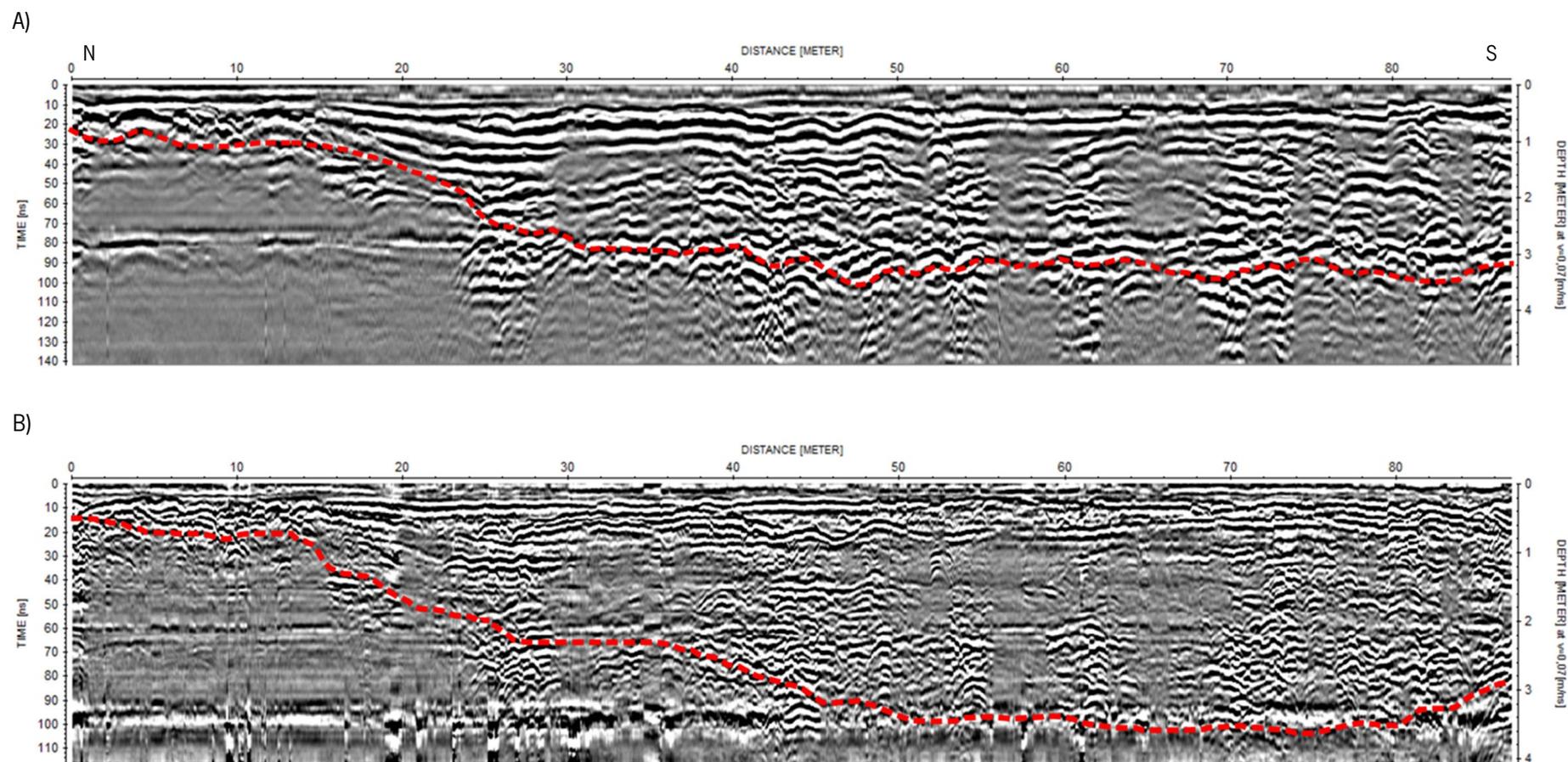
(Campo A a E



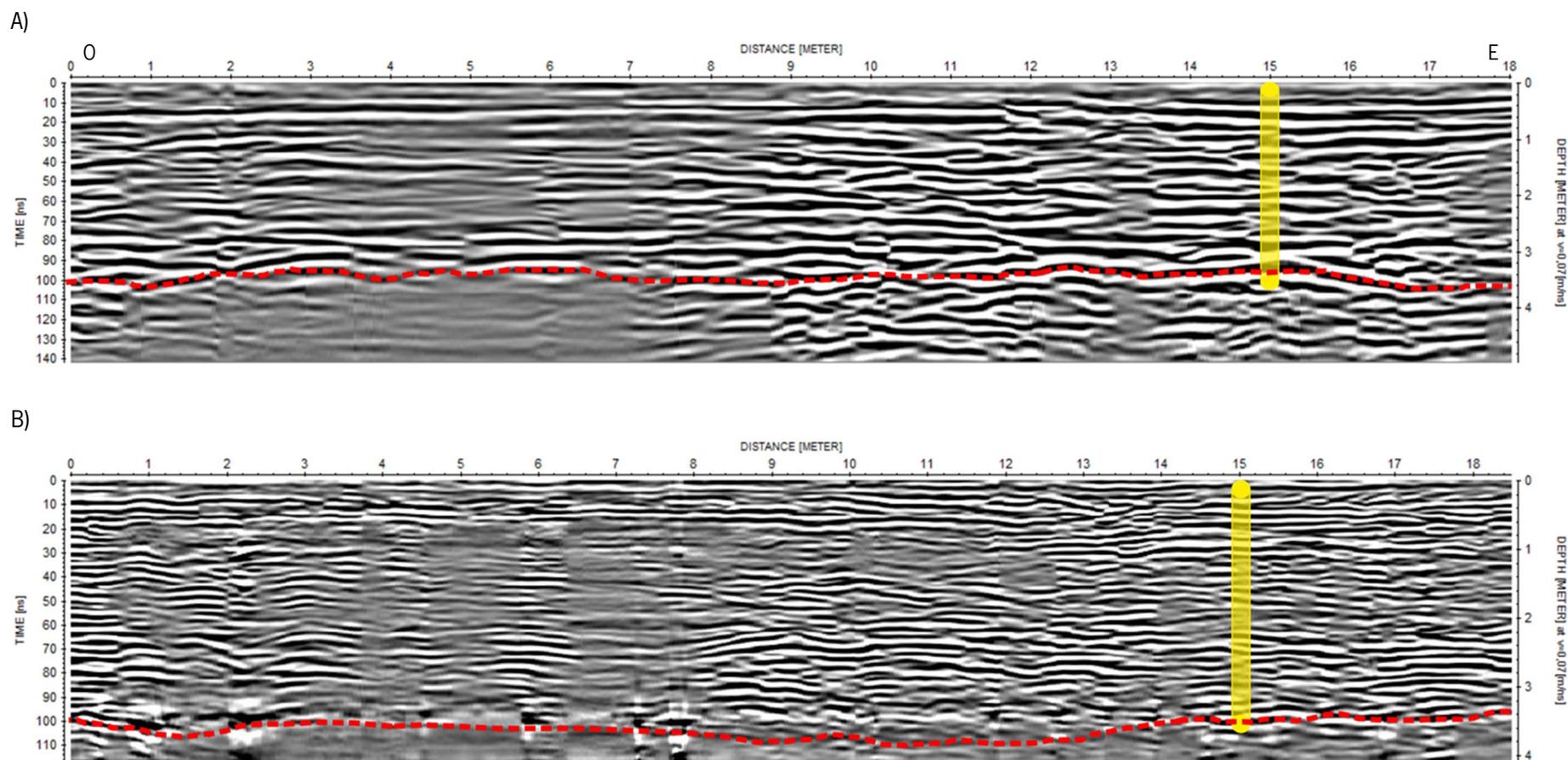
**Figura 1** – Radargramas correspondentes ao Campo A, Perfil 1, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade dos poços realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_040. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 93.74 m; B) Identificação F\_056. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 93.78 m.



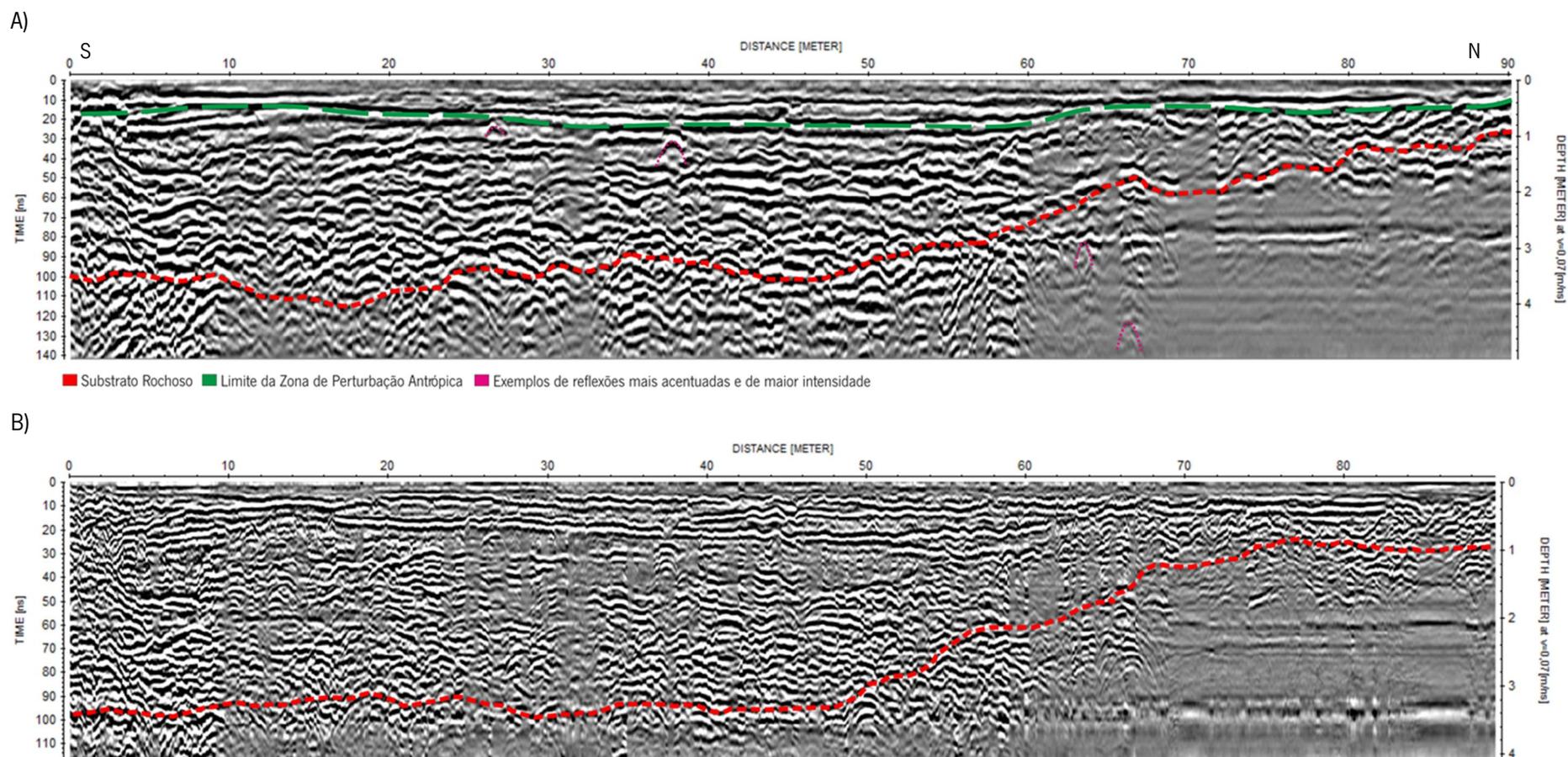
**Figura 2** – Radargramas correspondentes ao Campo A, Perfil 2, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade do poço realizado pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_041. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 29.98 m; B) Identificação F\_057. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 29.78 m.



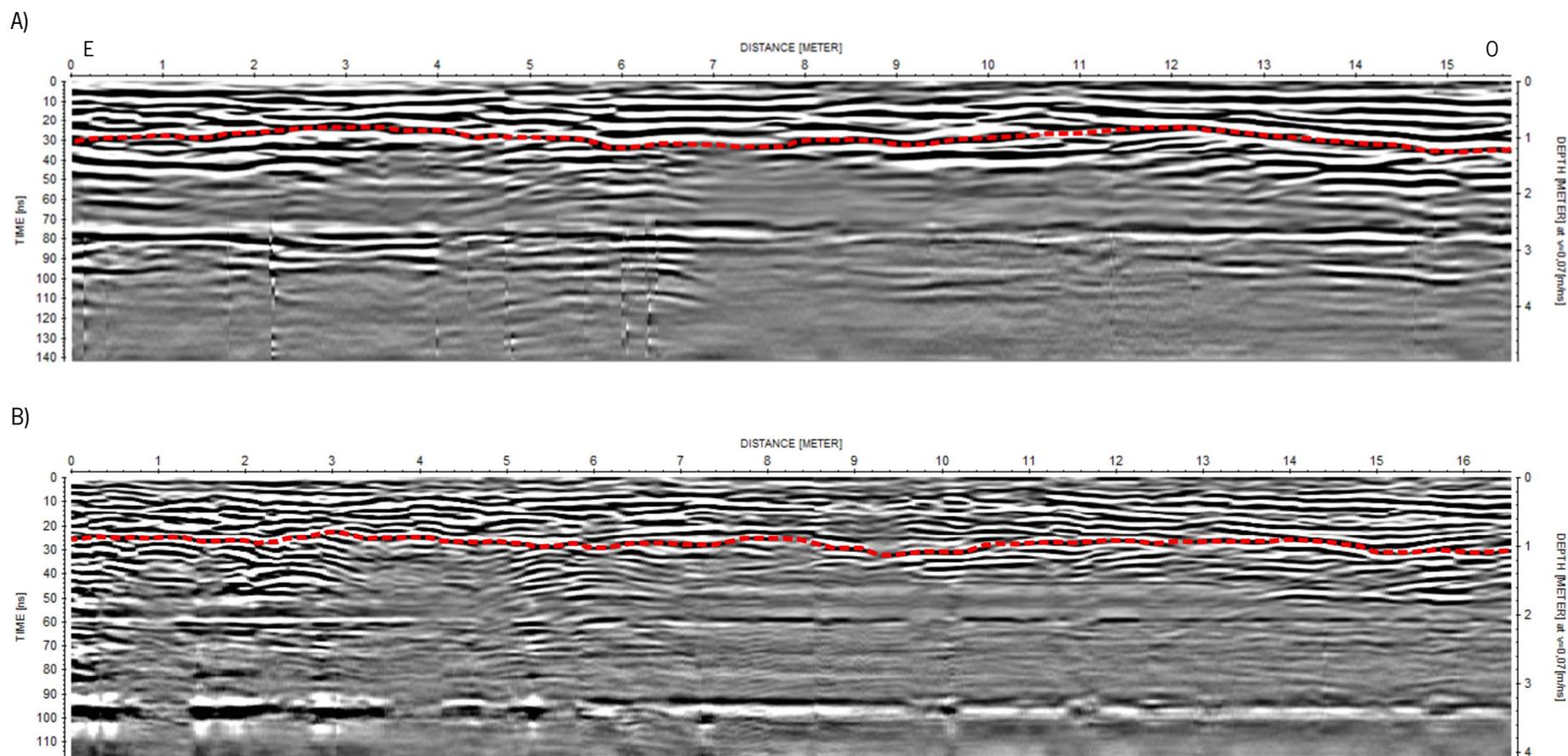
**Figura 3** – Radargramas correspondentes ao Campo A, Perfil 3, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_042. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 87.2 m; B) Identificação F\_058. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 87 m.



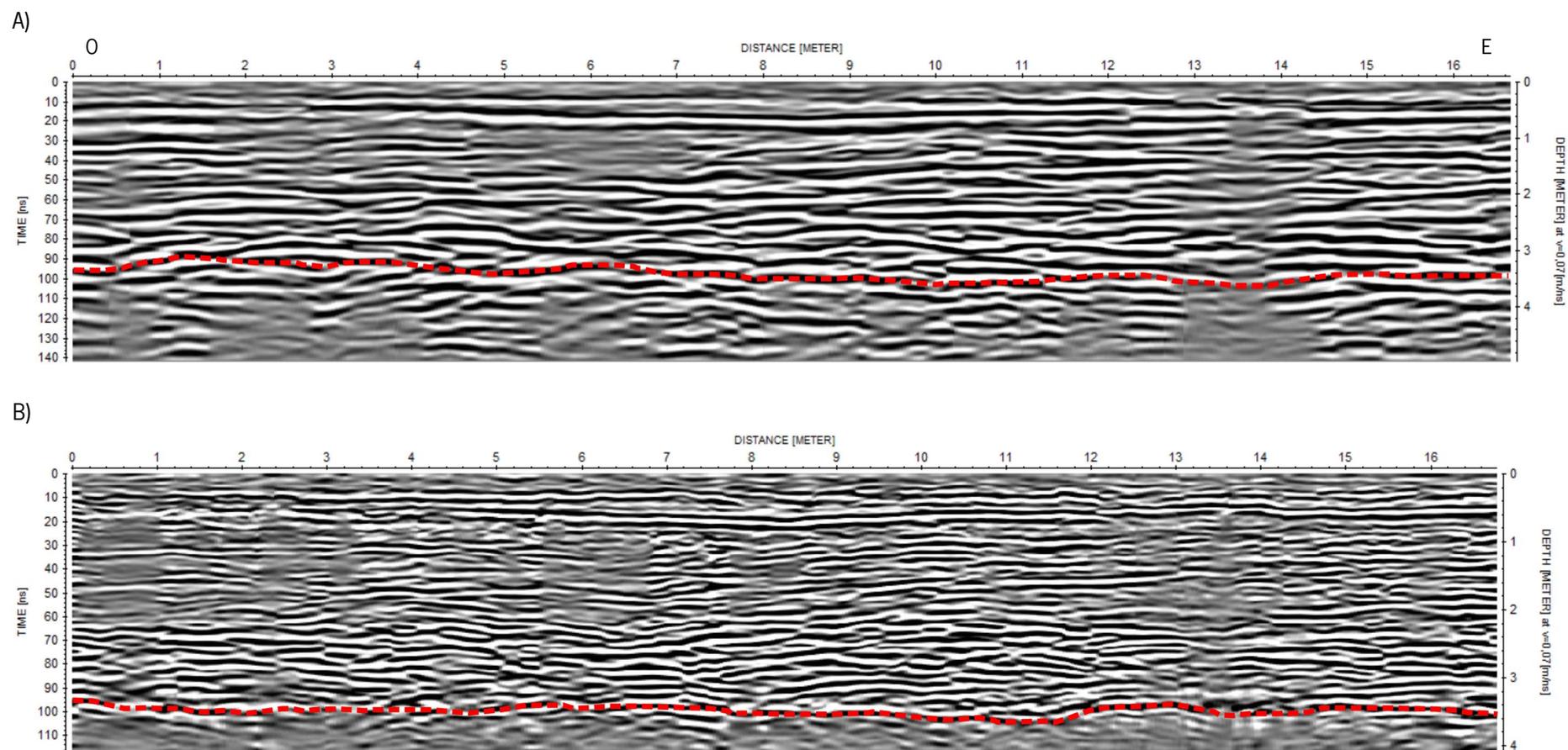
**Figura 4** – Radargramas correspondentes ao Campo A, Perfil 4, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade do poço realizado pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_043. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 18.00 m; B) Identificação F\_059. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 18.50 m.



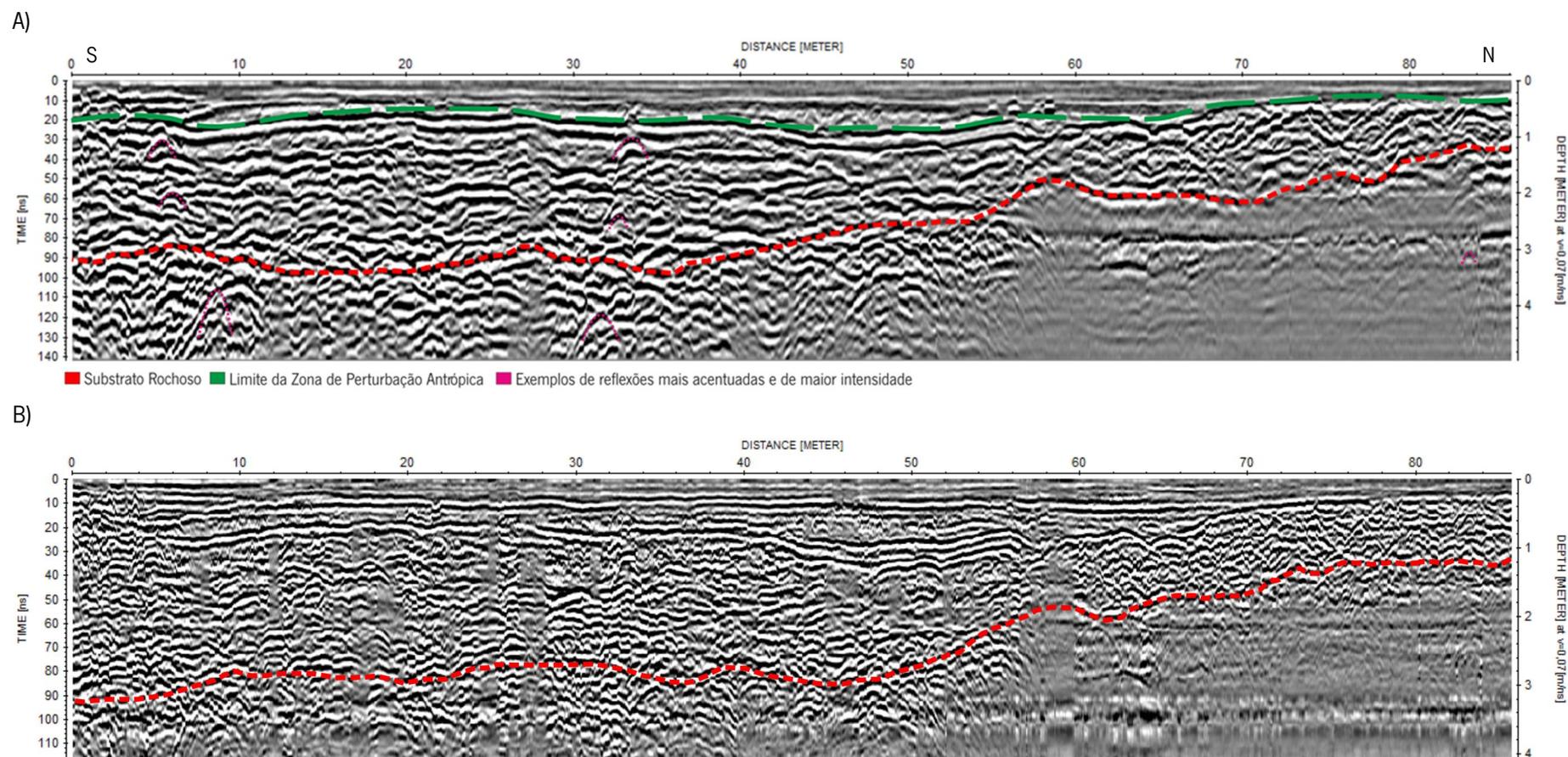
**Figura 5** – Radargramas correspondentes ao Campo B, Perfil 5, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_044. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 90.20 m; B) Identificação F\_060. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 89.50 m.



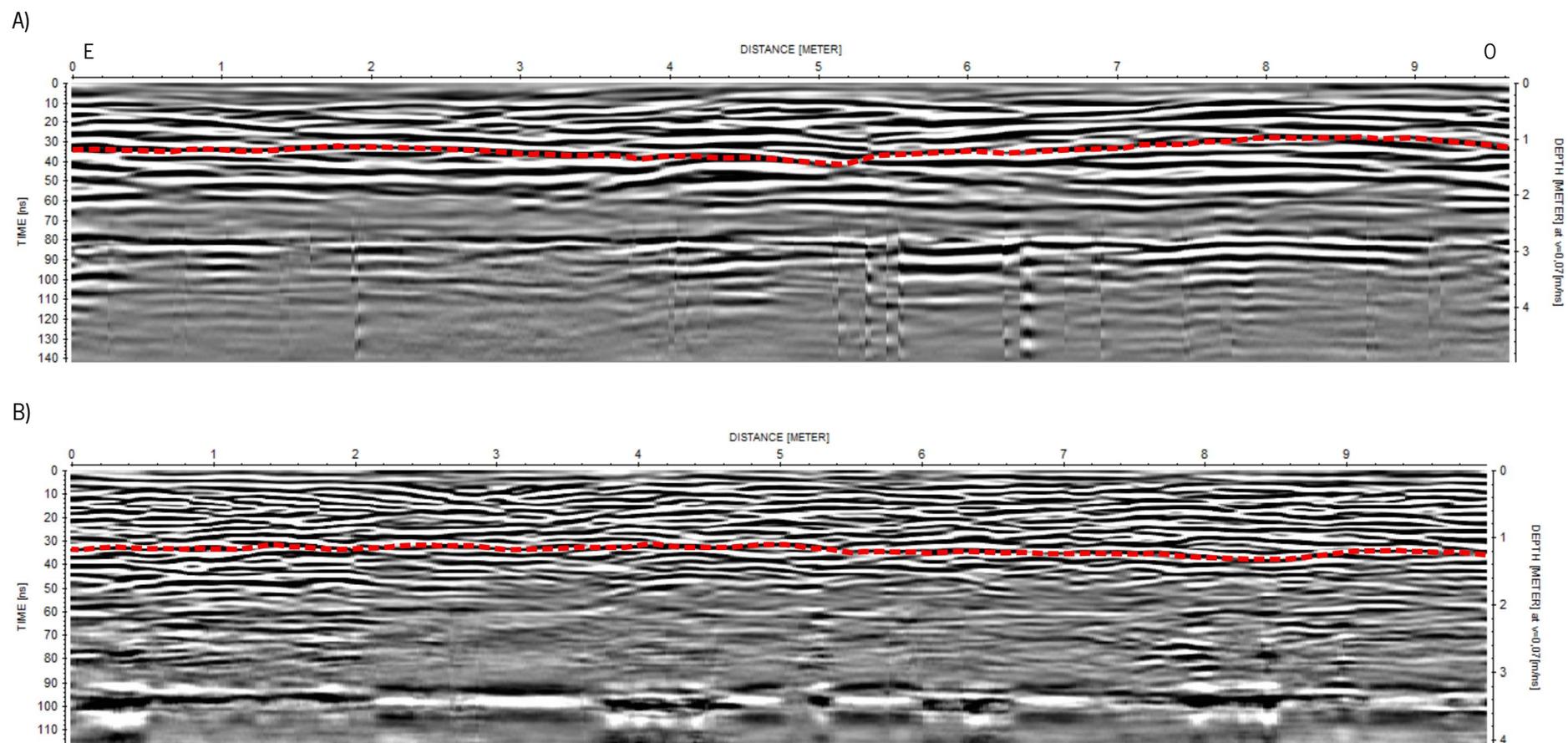
**Figura 6** – Radargramas correspondentes ao Campo B, Perfil 6, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_045. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 15.70 m; B) Identificação F\_061. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 16.54 m.



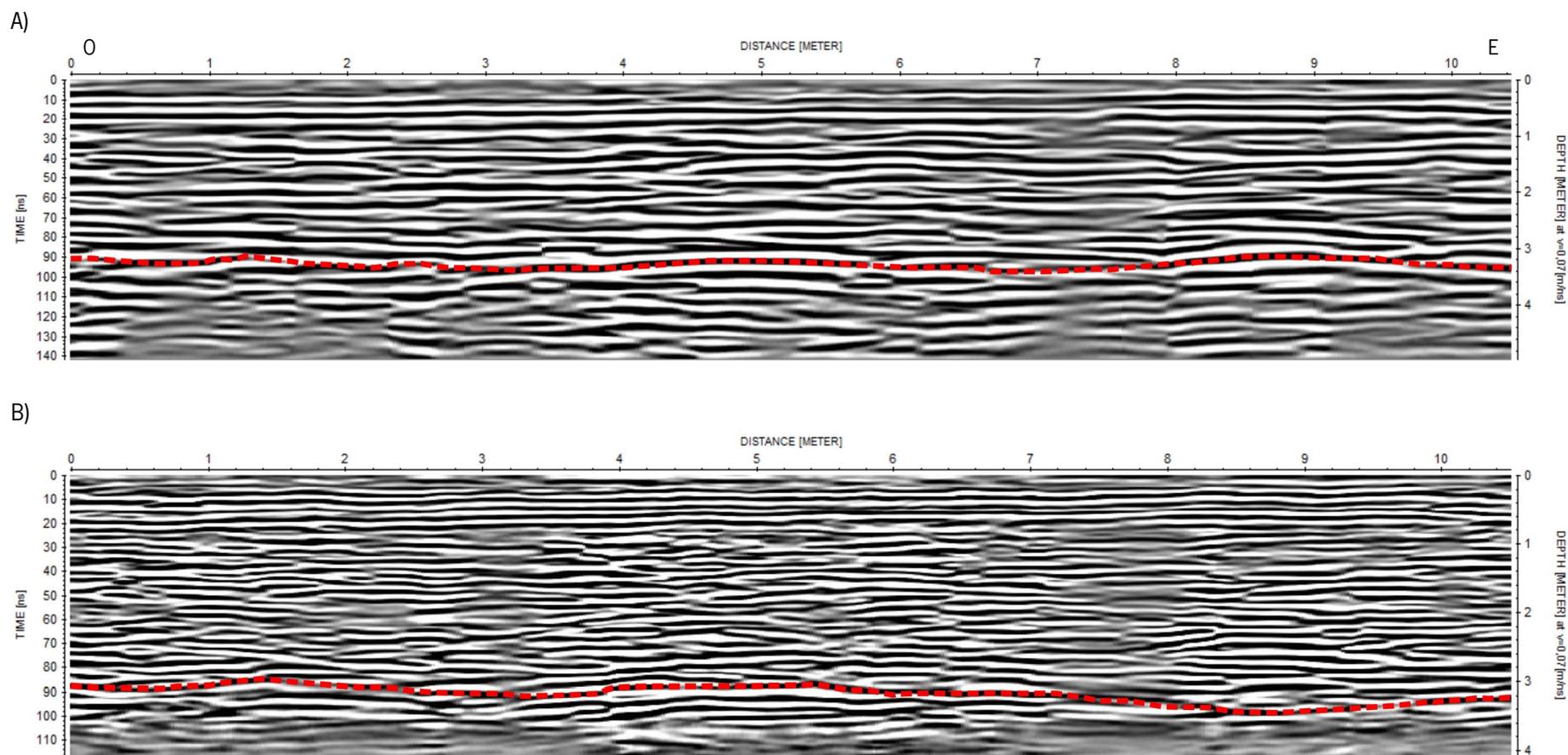
**Figura 7** – Radargramas correspondentes ao Campo B, Perfil 7, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_046. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 16.66 m; B) Identificação F\_062. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 16.78 m.



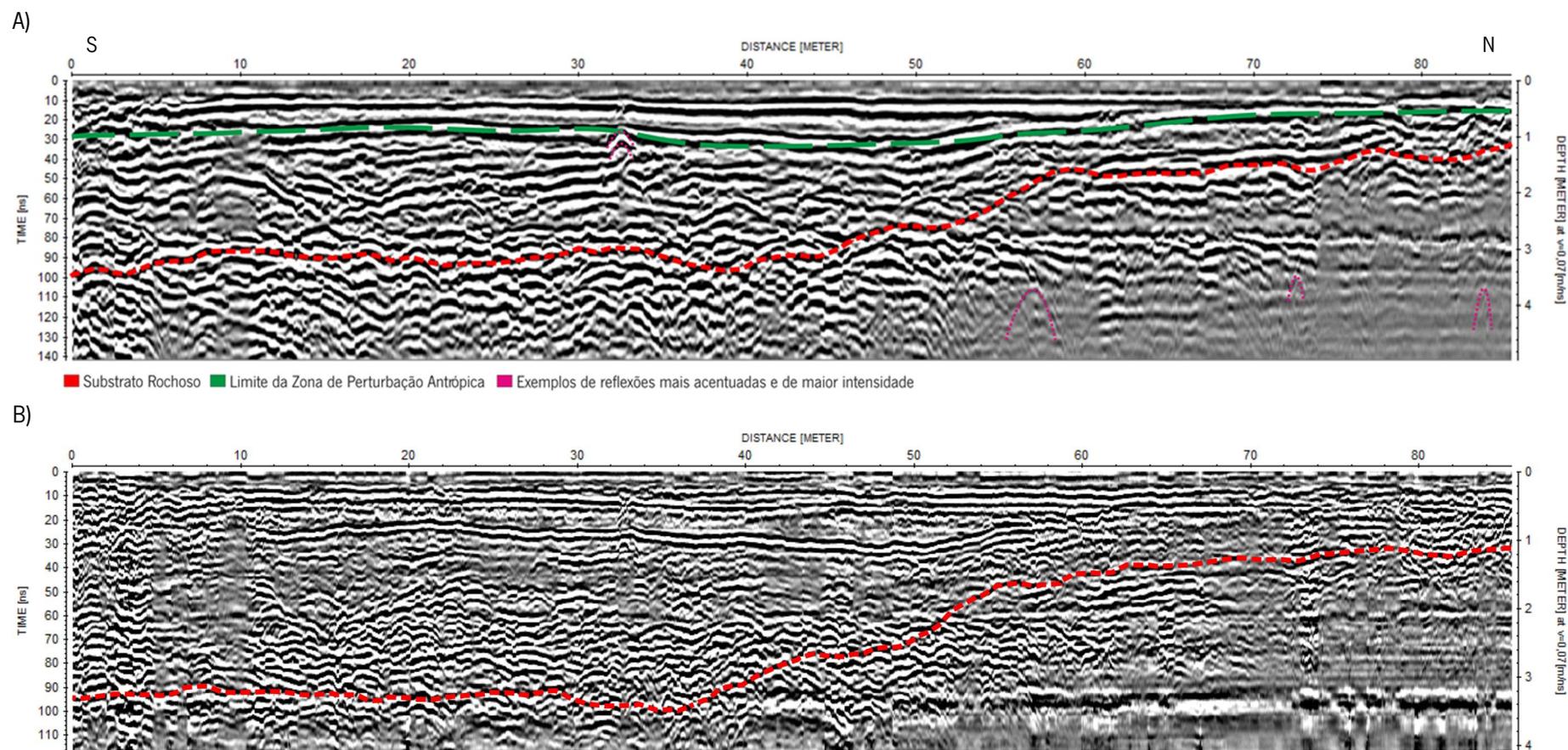
**Figura 8** – Radargramas correspondentes ao Campo C, Perfil 8, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_047. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 86.10 m; B) Identificação F\_063. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 85.74 m.



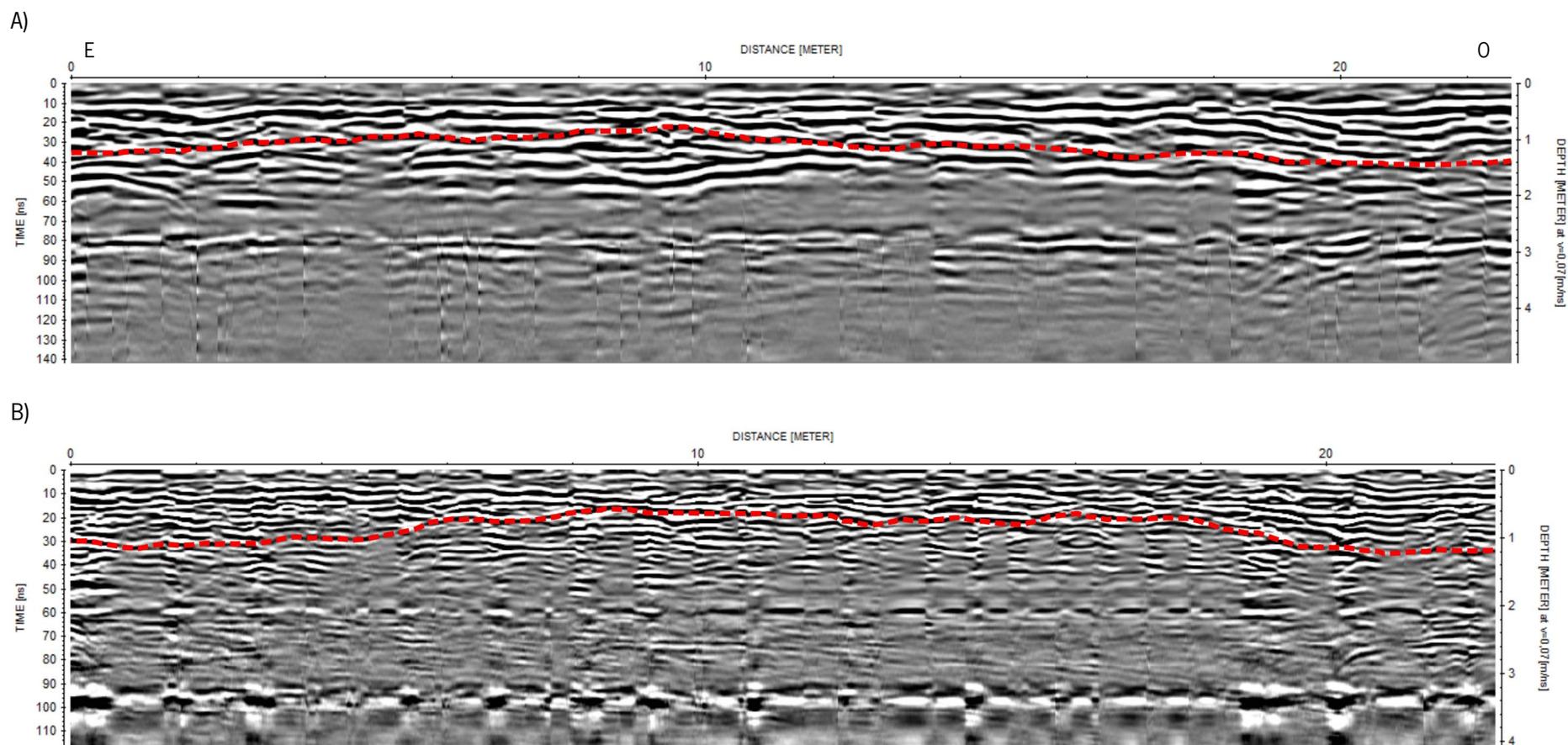
**Figura 9** – Radargramas correspondentes ao Campo C, Perfil 9, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_048. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 9.62 m; B) Identificação F\_064. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 9.98 m.



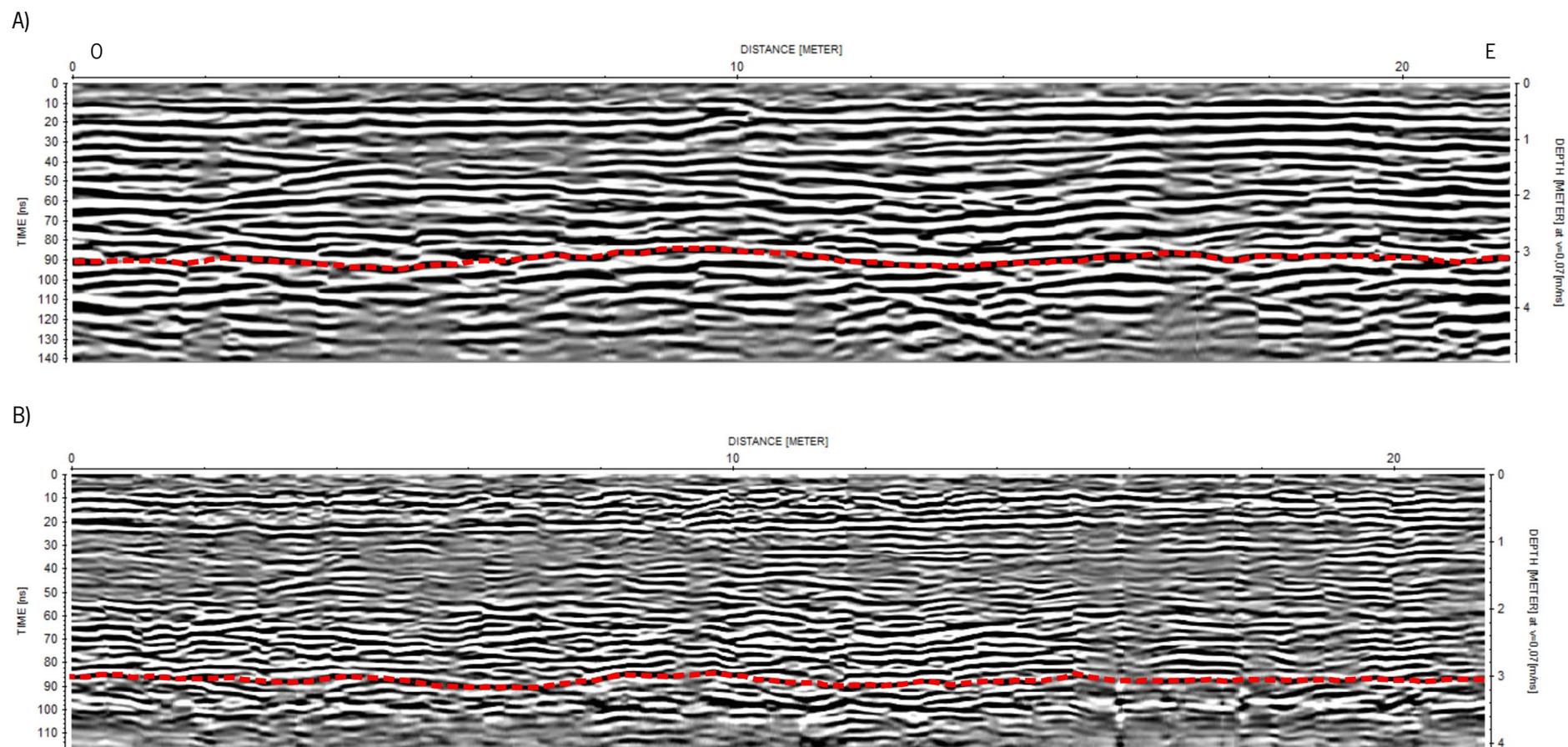
**Figura 10** – Radargramas correspondentes ao Campo C, Perfil 10, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_049. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 10.42 m; B) Identificação F\_065. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 10.50 m.



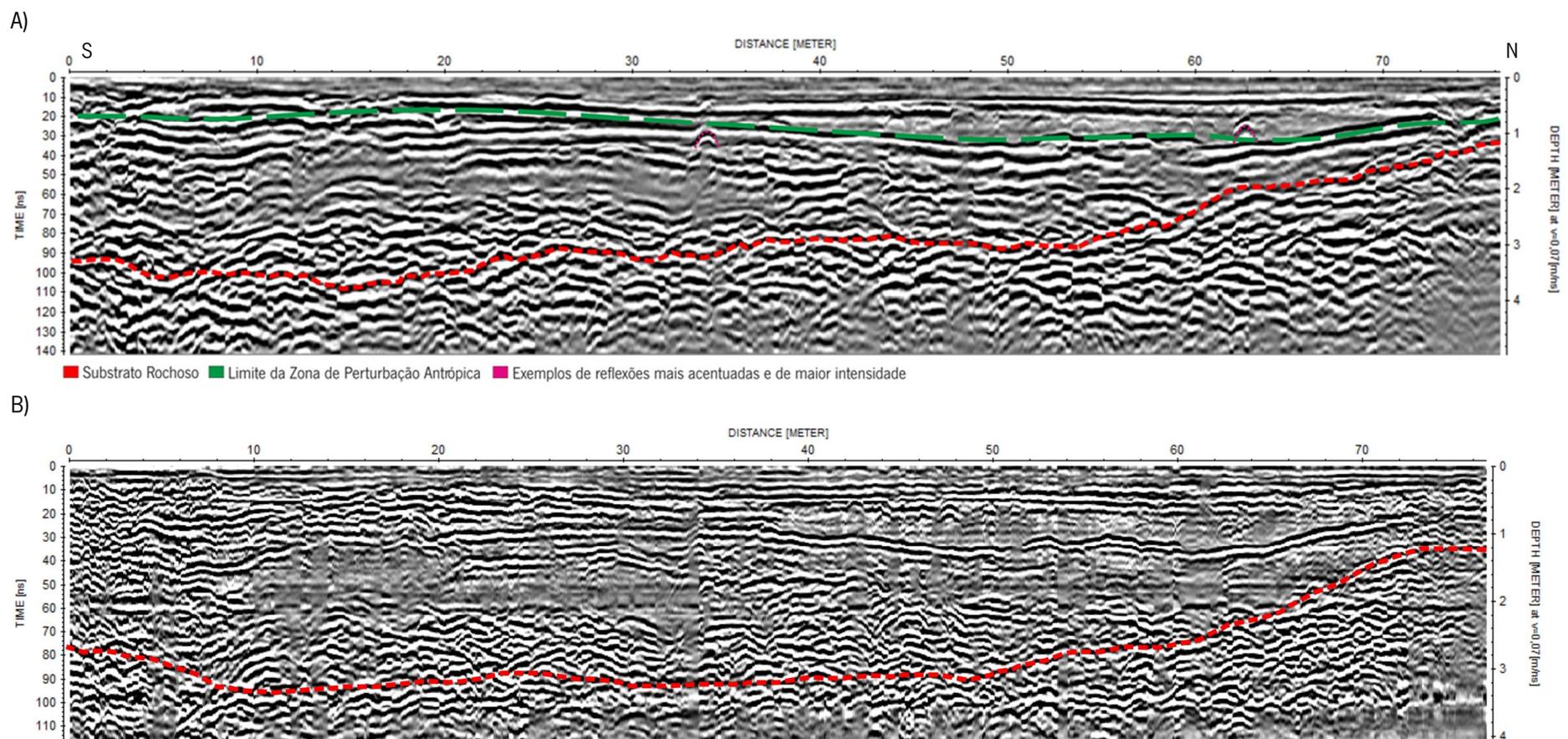
**Figura 11** – Radargramas correspondentes ao Campo D, Perfil 11, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_050. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 85.30 m; B) Identificação F\_066. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 85.54 m.



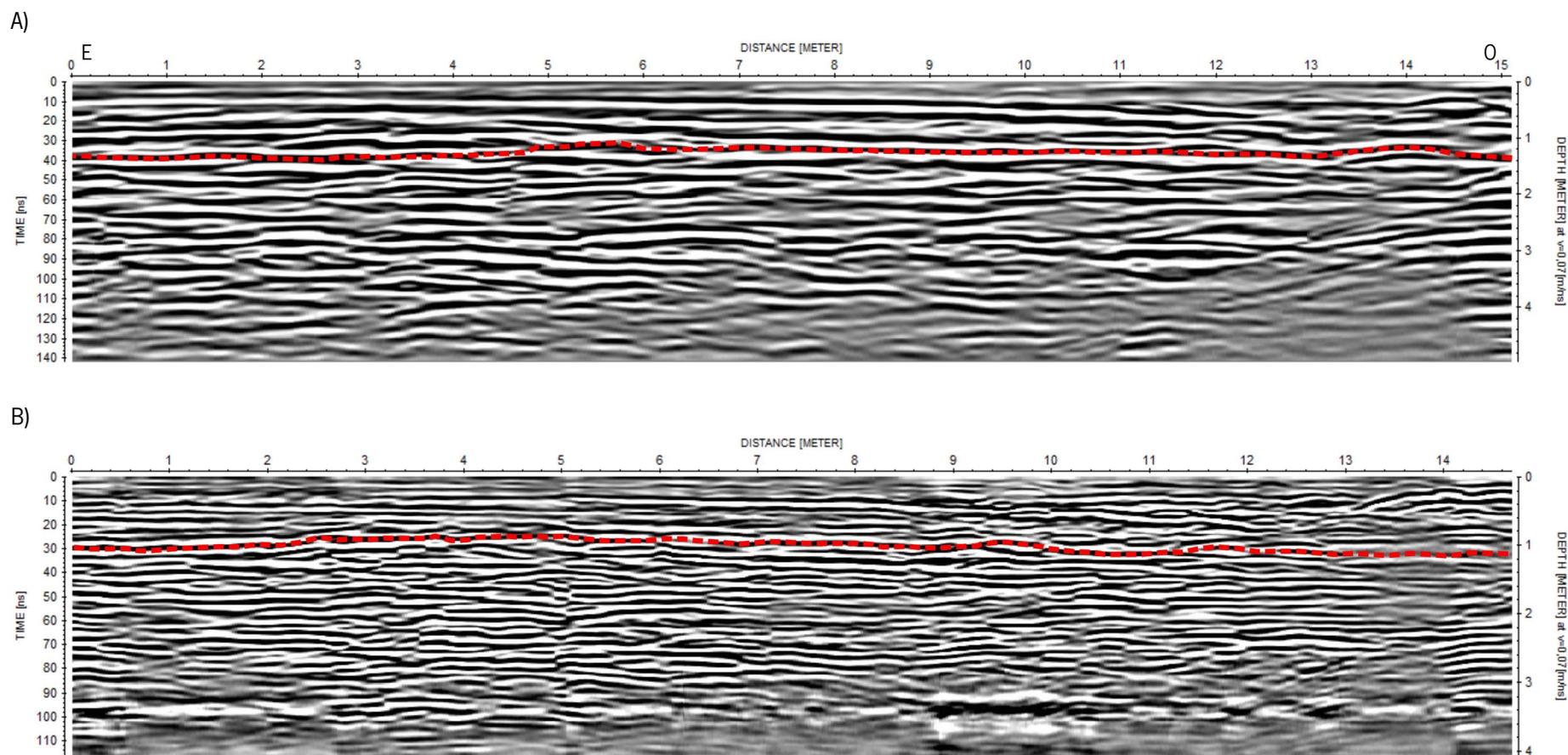
**Figura 12** – Radargramas correspondentes ao Campo D, Perfil 12, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_051. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 22.70 m; B) Identificação F\_067. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 22.70 m.



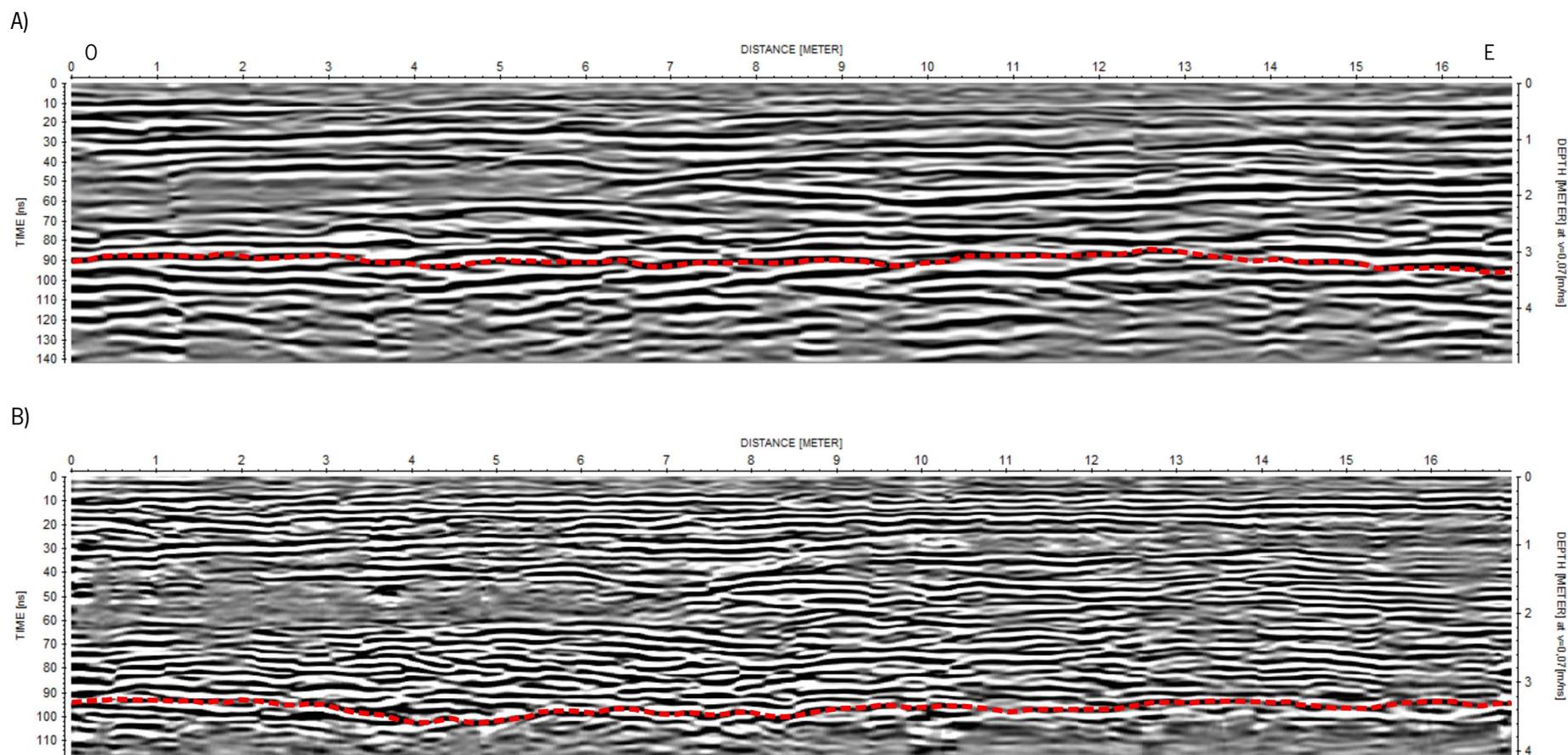
**Figura 13** – Radargramas correspondentes ao Campo D, Perfil 13, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_052. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 21.62 m; B) Identificação F\_068. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 21.38 m.



**Figura 14** – Radargramas correspondentes ao Campo E, Perfil 14, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_053. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 76.26 m; B) Identificação F\_069. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 76.70 m.



**Figura 15** – Radargramas correspondentes ao Campo E, Perfil 15, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_054. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 15.10 m; B) Identificação F\_070. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 14.70 m.

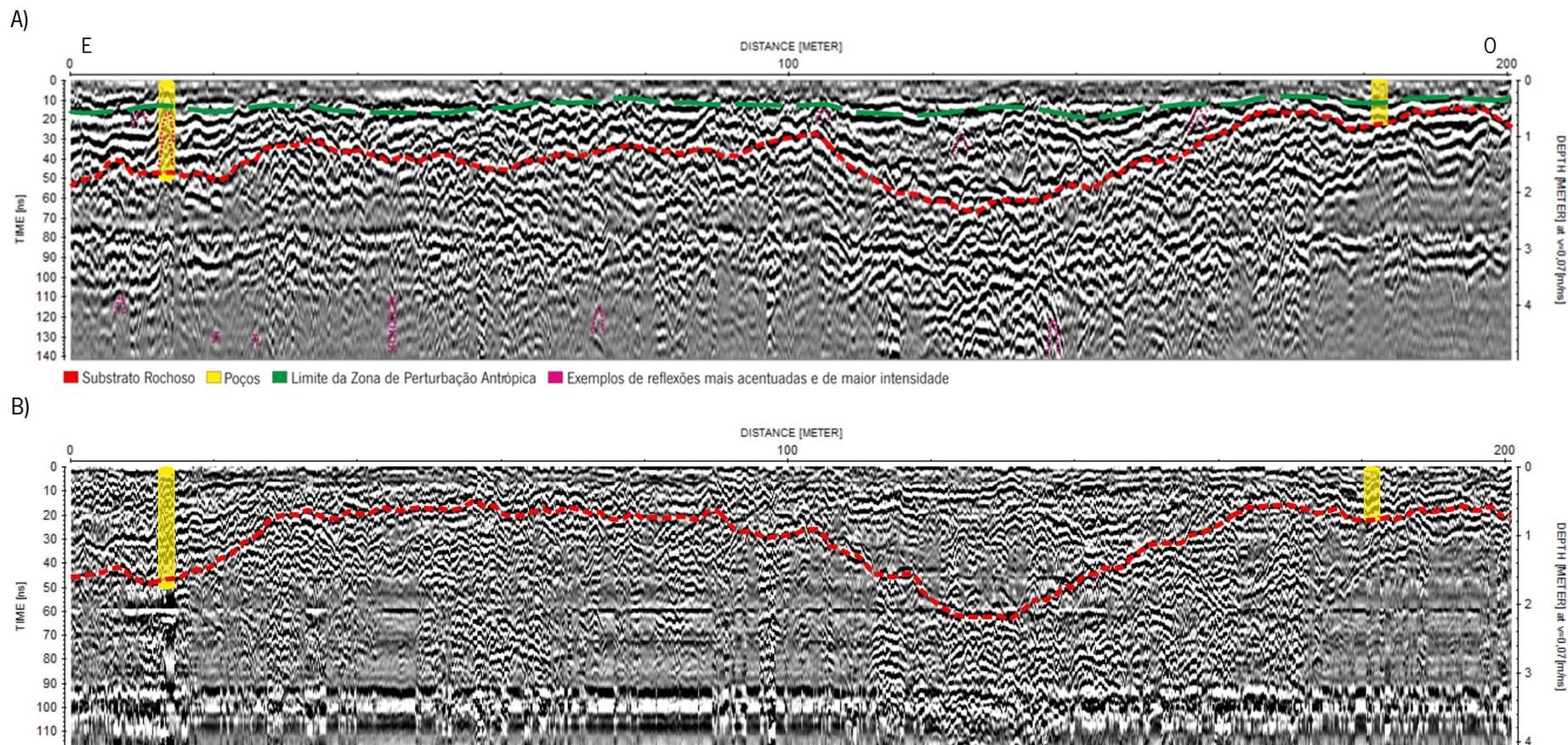


**Figura 16** – Radargramas correspondentes ao Campo E, Perfil 16, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_055. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 16.82 m; B) Identificação F\_071. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 16.94 m.

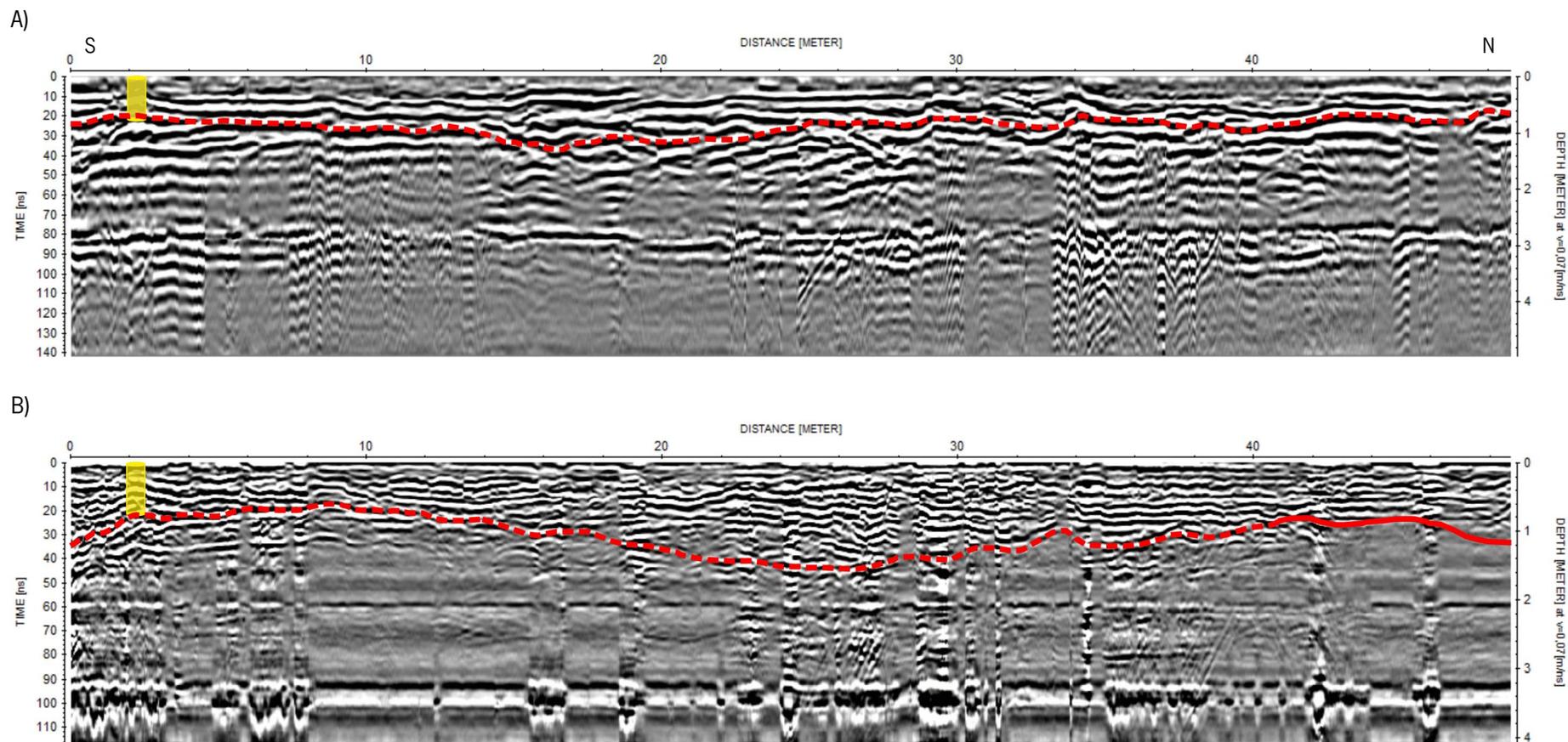


# Anexo 5

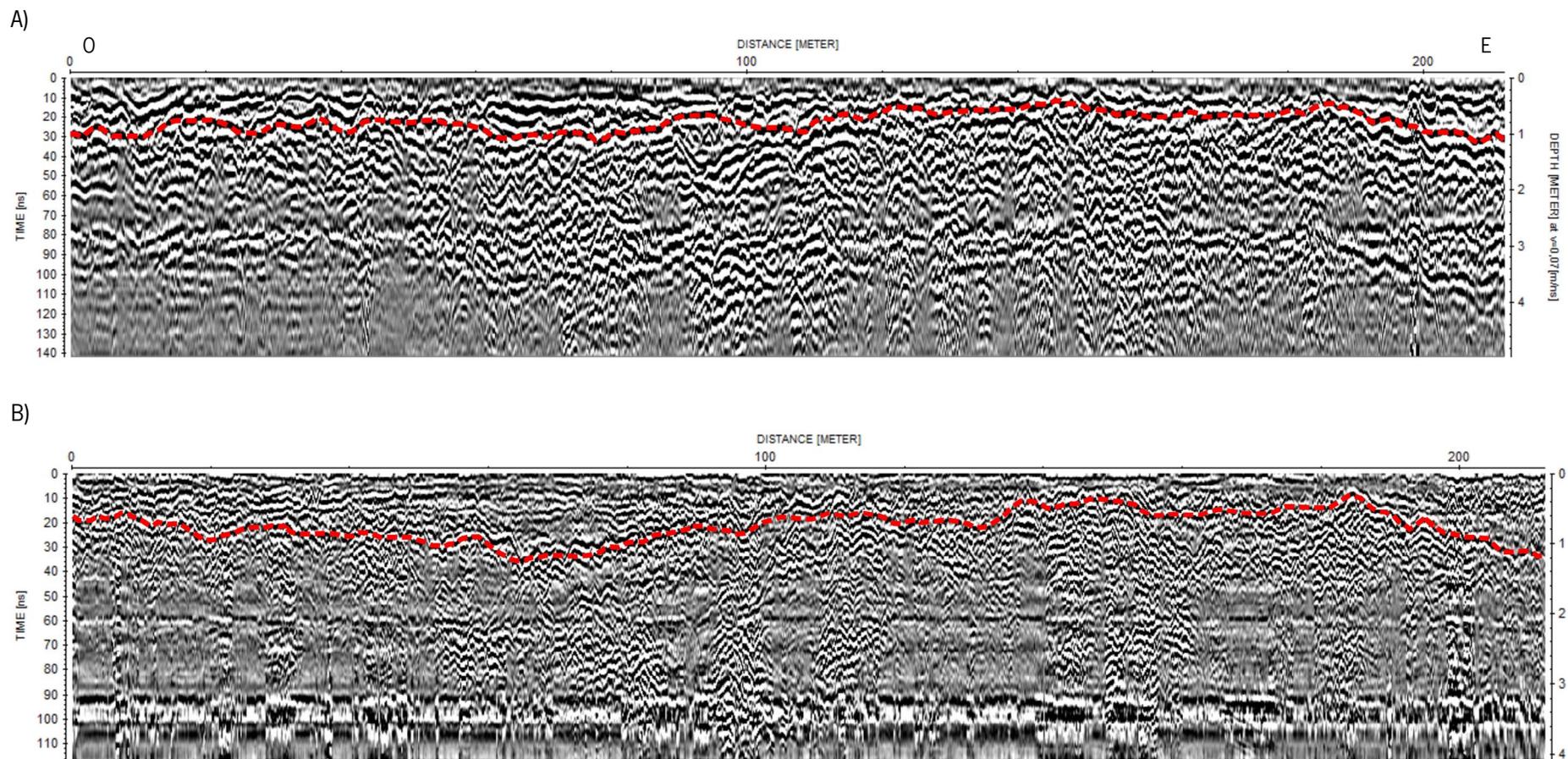
Radargramas – Área 2  
(Campo F)



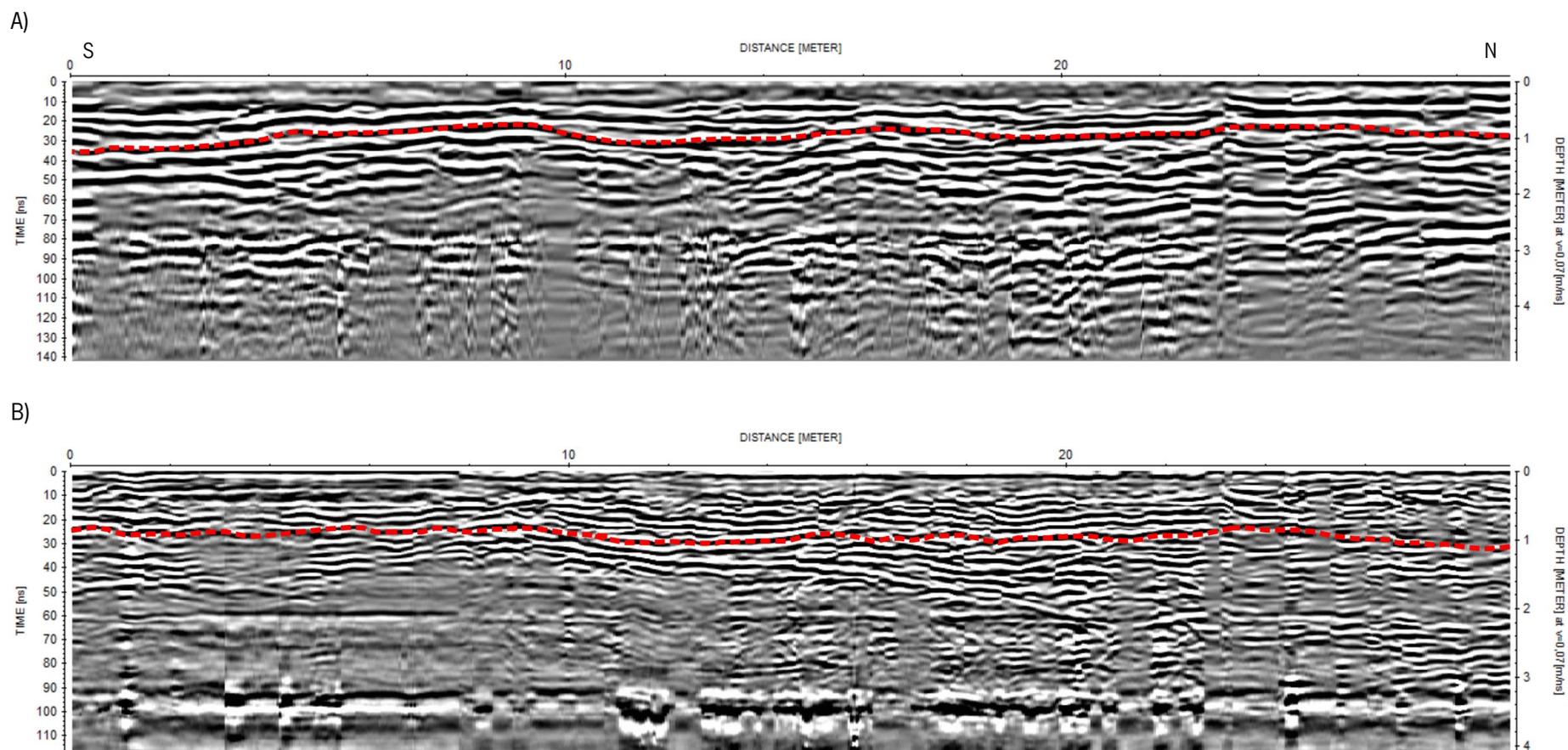
**Figura 17** – Radargramas correspondentes ao Campo F, Perfil 17, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade dos poços realizados pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_076. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 200.58 m; B) Identificação F\_072. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 200.98 m.



**Figura 18** – Radargramas correspondentes ao Campo F, Perfil 18, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade do poço realizado pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_077. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 48.78 m; B) Identificação F\_073. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 48.70 m.



**Figura 19** – Radargramas correspondentes ao Campo F, Perfil 19, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_078. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 212.00 m; B) Identificação F\_074. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 212.38 m.

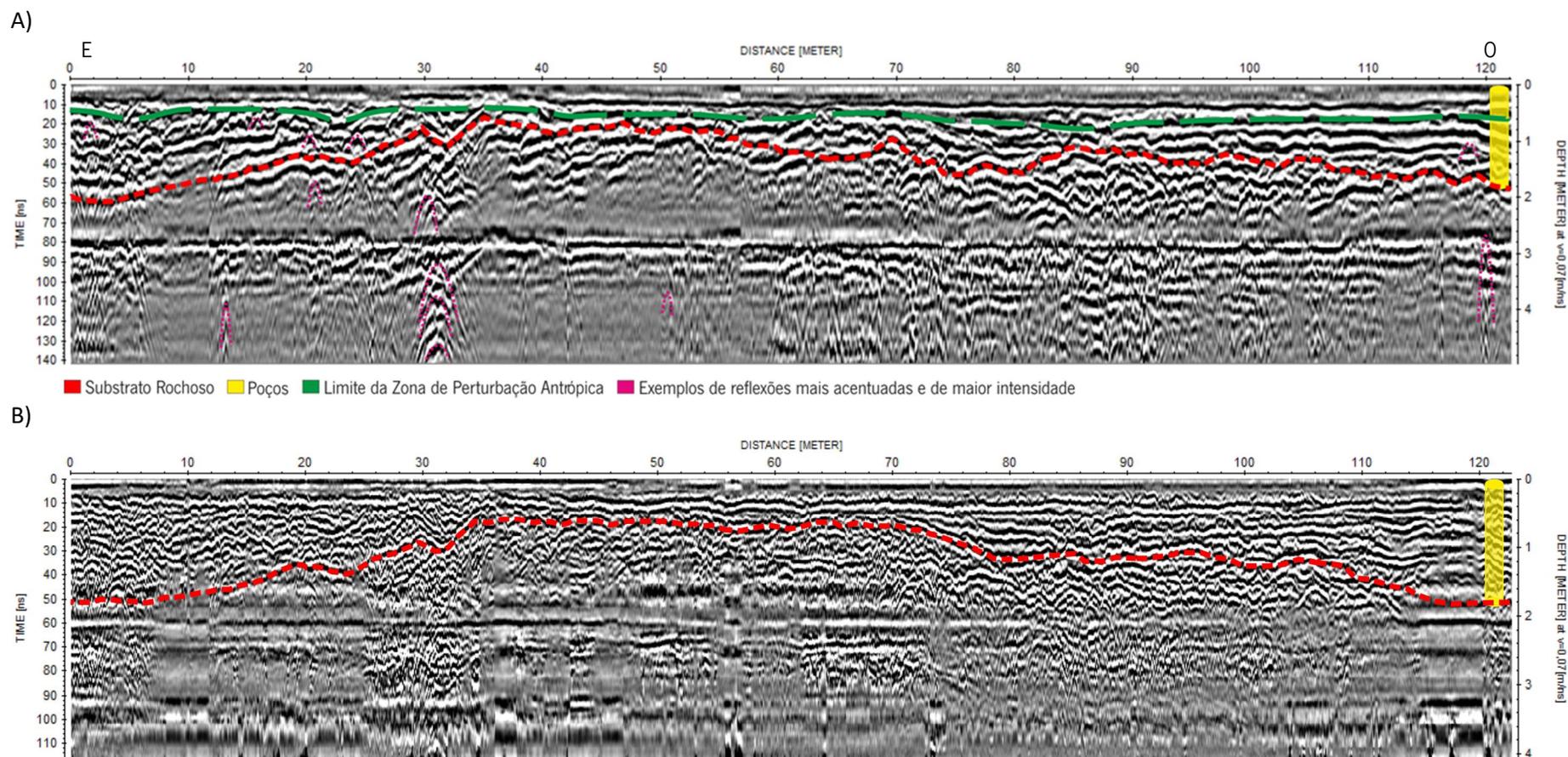


**Figura 20** – Radargramas correspondentes ao Campo F, Perfil 20, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_079. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 29.00 m; B) Identificação F\_075. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 28.90 m.

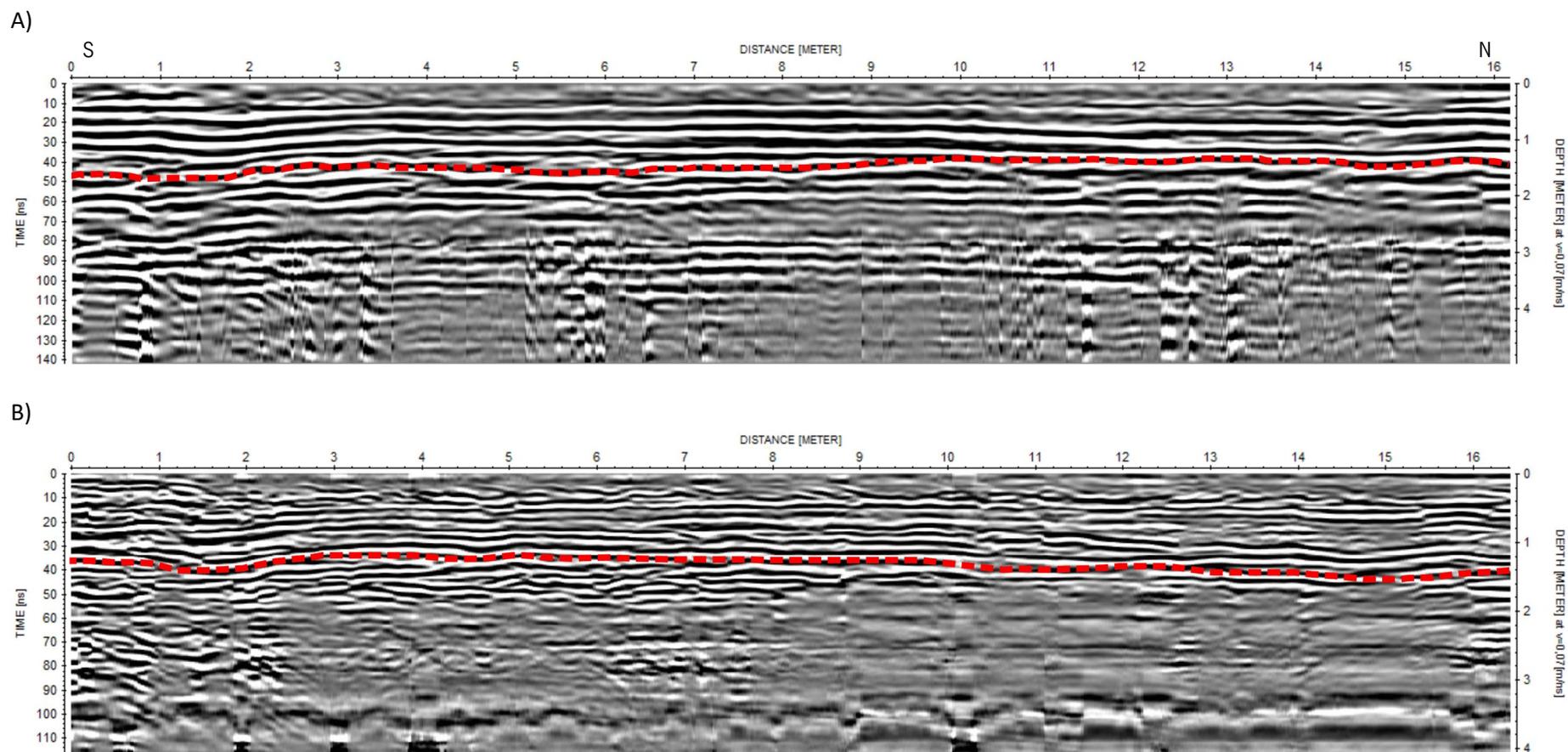


# Anexo 6

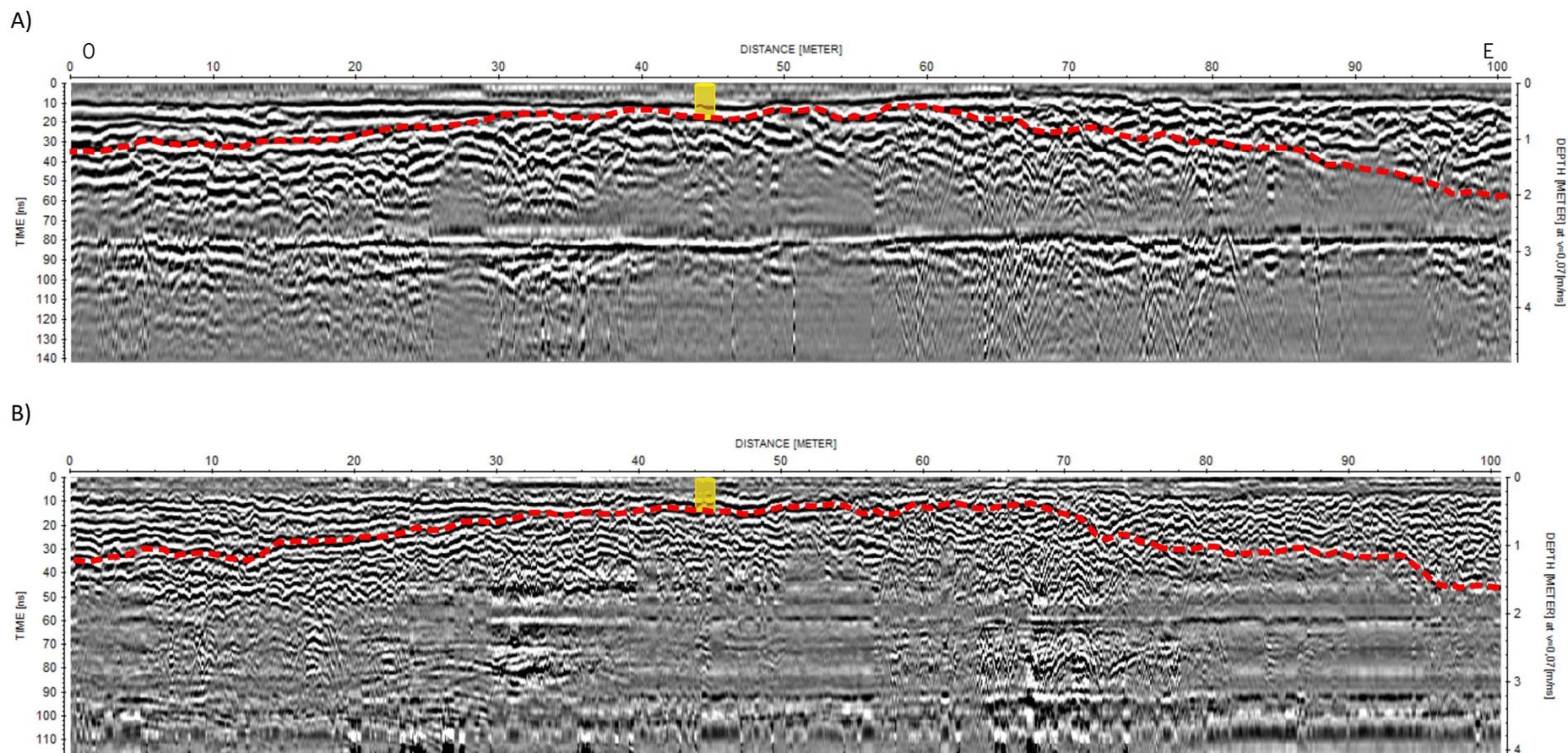
Radargramas Processados – Área 3  
(Campo G)



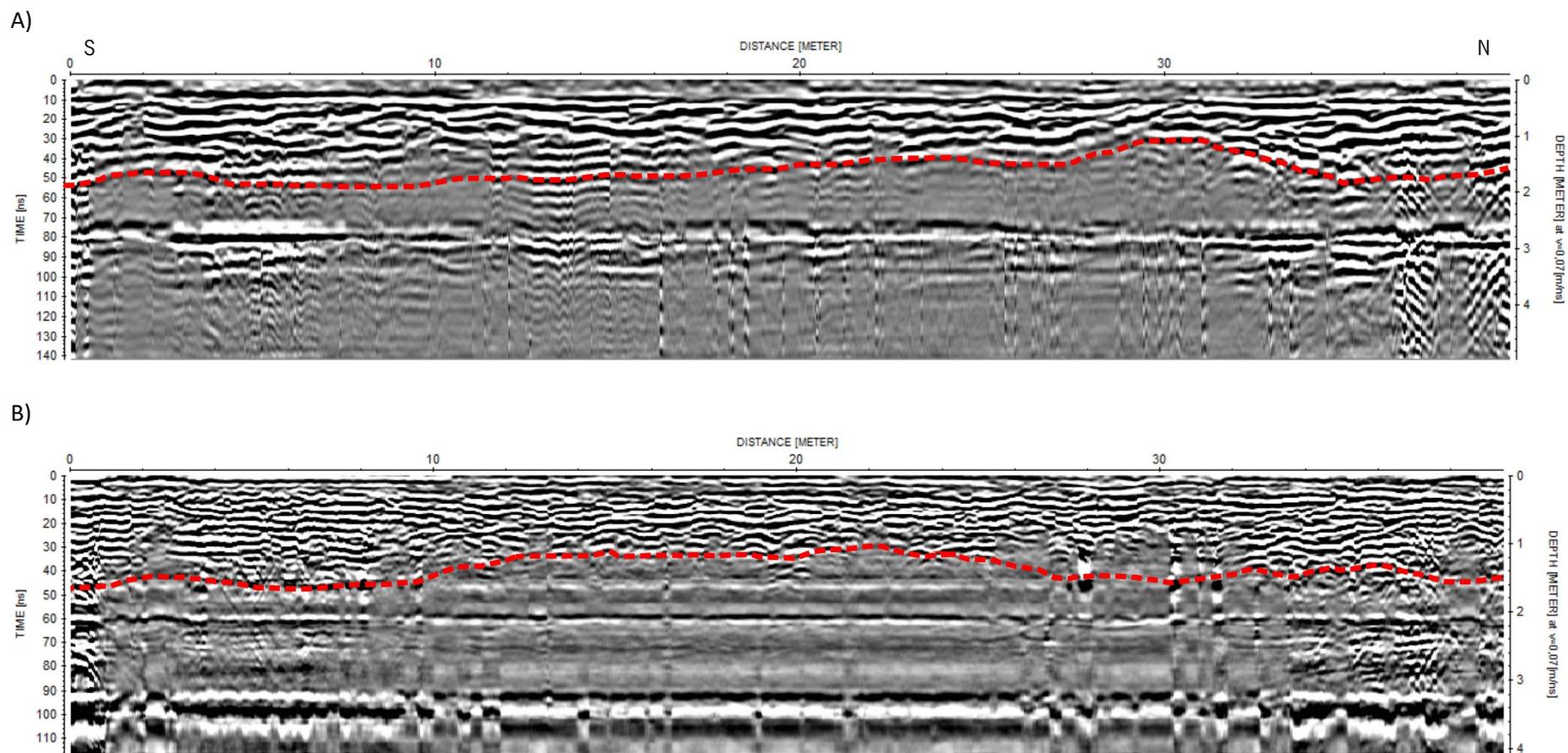
**Figura 21** – Radargramas correspondentes ao Campo G, Perfil 21, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade do poço realizado pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_080. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 122.14 m; B) Identificação F\_084. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 122.82 m.



**Figura 22** – Radargramas correspondentes ao Campo G, Perfil 22, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_081. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 16.18 m; B) Identificação F\_085. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 16.42 m.



**Figura 23** – Radargramas correspondentes ao Campo G, Perfil 23, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock e a amarelo a localização e respetiva profundidade do poço realizado pela Minerália - Minas, Geotecnia e Construções, Lda. A) Identificação F\_082. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 100.94 m; B) Identificação F\_086. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 100.70 m.



**Figura 24** – Radargramas correspondentes ao Campo G, Perfil 24, com a devida interpretação. A vermelho observa-se o nível interpretado do bedrock. A) Identificação F\_083. Perfil realizado com a antena de 200MHz. Comprimento: 39.46 m; B) Identificação F\_087. Perfil realizado com a antena de 400MHz. Comprimento: 39.46 m.



# Anexo 7

Dados Worksheet – Surfer 11

(Área 1, 2 e 3)

**Tabela 1** – Dados referentes aos cálculos efetuados com o Surfer 11 para a realização do modelo 3D da Área 1 (A1). **x\_x** - Início do perfil / **x\_x** - Fim do perfil. \* - Número do perfil e distância percorrida. \*\* - Calculado a partir da subtração do valor do solo ao valor da superfície.

ID*	X	Y	Superfície	Substrato**	Solo (m)
40_0	581294,10	4505798,68	100	97,20	2,8
40_5	581294,20	4505803,76	100	96,70	3,3
40_10	581294,30	4505808,83	100	96,70	3,3
40_15	581294,40	4505813,91	100	96,70	3,3
40_20	581294,50	4505818,98	100	96,50	3,5
40_25	581294,60	4505824,06	100	96,80	3,2
40_30	581294,70	4505829,13	100	96,50	3,5
40_35	581294,80	4505834,21	100	96,50	3,5
40_40	581294,90	4505839,29	100	96,70	3,3
40_45	581295,00	4505844,36	100	97,13	2,87
40_50	581295,10	4505849,44	100	97,20	2,8
40_55	581295,20	4505854,51	100	96,80	3,2
40_60	581295,30	4505859,59	100	96,93	3,07
40_65	581295,40	4505864,66	100	97,15	2,85
40_70	581295,50	4505869,74	100	97,30	2,7
40_75	581295,60	4505874,82	100	98,40	1,6
40_80	581295,70	4505879,89	100	98,68	1,32
40_85	581295,80	4505884,97	100	98,78	1,22
40_90	581295,90	4505890,04	100	99,40	0,6
40_93,74	581295,97	4505893,84	100	99,40	0,6
41_17	581296,6408	4505891,945	100	98,81	1,19
41_20	581293,7538	4505892,288	100	98,80	1,20
41_25	581288,9423	4505892,86	100	98,82	1,18
41_29,98	581284,15	4505893,43	100	99,00	1
42_0	581285,13	4505895,95	100	99,21	0,79
42_5	581284,7248	4505890,975	100	99,05	0,95
42_10	581284,3212	4505886,02	100	98,95	1,05
42_15	581283,9177	4505881,064	100	98,95	1,05
42_20	581283,5141	4505876,109	100	98,59	1,41
42_25	581283,1105	4505871,154	100	97,73	2,27
42_30	581282,7069	4505866,198	100	97,30	2,70
42_35	581282,3033	4505861,243	100	97,04	2,96
42_40	581281,8998	4505856,288	100	97,18	2,82
42_45	581281,4962	4505851,333	100	96,82	3,18
42_50	581281,0926	4505846,377	100	96,78	3,22
42_55	581280,689	4505841,422	100	96,90	3,10
42_60	581280,2855	4505836,467	100	96,92	3,08
42_65	581279,8819	4505831,511	100	96,92	3,08
42_70	581279,4783	4505826,556	100	96,61	3,39
42_75	581279,0747	4505821,601	100	96,92	3,08

42_80	581278,6712	4505816,646	100	96,62	3,38
42_85	581278,2676	4505811,69	100	96,73	3,27
<b>42_87,20</b>	581278,09	4505809,51	100	96,81	3,19
<b>43_0</b>	581278,00	4505823,79	100	96,48	3,52
43_5	581282,94	4505823,24	100	96,60	3,40
43_10	581287,86	4505822,70	100	96,60	3,40
43_15	581292,79	4505822,16	100	96,62	3,38
<b>43_18</b>	581295,74	4505821,83	100	96,40	3,60
<b>44_0</b>	581257,5	4505810,88	100	96,52	3,48
44_5	581258,0625	4505815,866	100	96,52	3,48
44_10	581258,6228	4505820,831	100	96,41	3,59
44_15	581259,1831	4505825,797	100	96,13	3,87
44_20	581259,7434	4505830,762	100	96,20	3,80
44_25	581260,3037	4505835,728	100	96,60	3,40
44_30	581260,864	4505840,694	100	96,60	3,40
44_35	581261,4243	4505845,659	100	96,90	3,10
44_40	581261,9846	4505850,625	100	96,77	3,23
44_45	581262,5449	4505855,591	100	96,43	3,57
44_50	581263,1052	4505860,556	100	96,78	3,22
44_55	581263,6655	4505865,522	100	97,03	2,97
44_60	581264,2258	4505870,488	100	97,40	2,60
44_65	581264,7861	4505875,453	100	98,10	1,90
44_70	581265,3464	4505880,419	100	98,00	2,00
44_75	581265,9067	4505885,384	100	98,30	1,70
44_80	581266,467	4505890,35	100	98,77	1,23
44_85	581267,0273	4505895,316	100	98,81	1,19
<b>44_90,20</b>	581267,61	4505900,48	100	99,04	0,96
<b>45_0</b>	581283,61	4505891,64	100	98,92	1,08
45_5	581277,7215	4505892,287	100	99,00	1,00
45_10	581271,8329	4505892,933	100	99,00	1,00
45_15,70	581265,12	4505893,67	100	98,77	1,23
<b>46_0</b>	581257,15	4505824,09	100	96,62	3,38
46_5	581263,1854	4505823,484	100	96,60	3,40
46_10	581269,2208	4505822,878	100	96,40	3,60
46_15	581275,2562	4505822,271	100	96,60	3,40
<b>46_16,66</b>	581277,26	4505822,07	100	96,58	3,42
<b>47_0</b>	581244,57	4505816,32	100	96,80	3,2
47_5	581245,18	4505821,22	100	97,00	3
47_10	581245,78	4505826,12	100	96,80	3,2
47_15	581246,39	4505831,02	100	96,60	3,4
47_20	581246,99	4505835,93	100	96,60	3,4
47_25	581247,60	4505840,83	100	96,82	3,18
47_30	581248,20	4505845,73	100	96,80	3,2
47_35	581248,81	4505850,63	100	96,60	3,4
47_40	581249,41	4505855,53	100	96,90	3,1

47_45	581250,02	4505860,43	100	97,22	2,78
47_50	581250,62	4505865,33	100	97,42	2,58
47_55	581251,23	4505870,23	100	97,70	2,3
47_60	581251,83	4505875,14	100	98,10	1,9
47_65	581252,44	4505880,04	100	97,94	2,06
47_70	581253,04	4505884,94	100	97,82	2,18
47_75	581253,65	4505889,84	100	98,22	1,78
47_80	581254,25	4505894,74	100	98,60	1,4
47_85	581254,86	4505899,64	100	98,80	1,2
<b>47_86,10</b>	581254,99	4505900,72	100	98,80	1,2
<b>48_0</b>	581264,35	4505895,53	100	98,80	1,2
48_5	581259,28	4505896,12	100	98,60	1,4
48_9,62	581254,60	4505896,66	100	98,90	1,1
49_0	581244,97	4505830,29	100	96,80	3,2
49_5	581250,73	4505829,70	100	96,80	3,2
<b>49_10,42</b>	581256,97	4505829,06	100	96,70	3,3
<b>50_0</b>	581221,81	4505823,18	100	96,60	3,40
50_5	581222,44	4505828,00	100	96,79	3,21
50_10	581223,08	4505832,82	100	97,00	3,00
50_15	581223,71	4505837,64	100	96,82	3,18
50_20	581224,35	4505842,46	100	96,82	3,18
50_25	581224,98	4505847,29	100	96,78	3,22
50_30	581225,62	4505852,11	100	97,00	3,00
50_35	581226,25	4505856,93	100	96,90	3,10
50_40	581226,89	4505861,75	100	96,73	3,27
50_45	581227,52	4505866,57	100	97,00	3,00
50_50	581228,16	4505871,39	100	97,40	2,60
50_55	581228,79	4505876,21	100	97,83	2,17
50_60	581229,43	4505881,03	100	98,38	1,62
50_65	581230,06	4505885,86	100	98,38	1,62
50_70	581230,70	4505890,68	100	98,50	1,50
50_75	581231,33	4505895,50	100	98,59	1,41
50_80	581231,97	4505900,32	100	98,62	1,38
<b>50_85,30</b>	581232,64	4505905,43	100	98,80	1,20
<b>51_0</b>	581254,00	4505896,00	100	98,78	1,22
51_5	581248,63	4505896,58	100	99,02	0,98
51_10	581243,26	4505897,16	100	99,12	0,88
51_15	581237,89	4505897,74	100	98,83	1,17
51_20	581232,52	4505898,32	100	98,59	1,41
<b>51_22,70</b>	581229,62	4505898,63	100	98,60	1,40
<b>52_0</b>	581223,14	4505840,11	100	96,80	3,2
52_5	581228,37	4505839,54	100	96,67	3,33
52_10	581233,61	4505838,97	100	97,00	3
52_15	581238,84	4505838,40	100	96,80	3,2
52_20	581244,07	4505837,83	100	96,90	3,1

52_21,62	581245,77	4505837,64	100	96,90	3,1
53_0	581203,55	4505826,66	100	96,70	3,3
53_5	581204,23	4505831,40	100	96,40	3,6
53_10	581204,92	4505836,15	100	96,48	3,52
53_15	581205,60	4505840,89	100	96,21	3,79
53_20	581206,28	4505845,63	100	96,50	3,5
53_25	581206,97	4505850,37	100	96,80	3,2
53_30	581207,65	4505855,12	100	96,78	3,22
53_35	581208,33	4505859,86	100	96,82	3,18
53_40	581209,02	4505864,60	100	97,10	2,9
53_45	581209,70	4505869,35	100	97,02	2,98
53_50	581210,38	4505874,09	100	96,93	3,07
53_55	581211,07	4505878,83	100	97,18	2,82
53_60	581211,75	4505883,58	100	97,60	2,4
53_65	581212,43	4505888,32	100	98,03	1,97
53_70	581213,11	4505893,06	100	98,39	1,61
53_75	581213,80	4505897,80	100	98,76	1,24
53_76,26	581213,97	4505899,00	100	98,80	1,2
54_0	581228,68	4505894,09	100	98,70	1,3
54_5	581223,32	4505894,66	100	98,82	1,18
54_10	581217,95	4505895,23	100	98,74	1,26
54_15,10	581212,48	4505895,81	100	98,60	1,4
55_0	581204,86	4505846,86	100	96,82	3,18
55_5	581210,25	4505846,31	100	96,83	3,17
55_10	581215,64	4505845,75	100	96,80	3,2
55_15	581221,04	4505845,20	100	96,80	3,2
55_16,82	581223,00	4505845,00	100	96,62	3,38

**Tabela 2** – Dados referentes aos cálculos efetuados com o Surfer 11 para a realização do modelo 3D da Área 2 (A2). **x\_x** - Início do perfil / **x\_x** - Fim do perfil. \* - Número do perfil e distância percorrida. \*\* - Calculado a partir da subtração do valor do solo ao valor da superfície.

ID*	X	Y	Superfície	Substrato**	Solo (m)
76_0	580686,00	4506069,00	100	98,18	1,82
76_5	580681,11	4506068,03	100	98,40	1,60
76_10	580676,23	4506067,06	100	98,38	1,62
76_15	580671,36	4506066,09	100	98,38	1,62
76_20	580666,48	4506065,12	100	98,23	1,77
76_25	580661,61	4506064,15	100	98,58	1,42
76_30	580656,72	4506063,17	100	98,80	1,20
76_35	580651,86	4506062,21	100	98,90	1,10
76_40	580646,97	4506061,23	100	98,76	1,24
76_45	580642,11	4506060,27	100	98,60	1,40
76_50	580637,22	4506059,29	100	98,60	1,40
76_55	580632,35	4506058,33	100	98,53	1,47

76_60	580627,47	4506057,35	100	98,40	1,60
76_65	580622,60	4506056,38	100	98,60	1,40
76_70	580617,72	4506055,41	100	98,64	1,36
76_75	580612,85	4506054,44	100	98,72	1,28
76_80	580607,96	4506053,47	100	98,80	1,20
76_85	580603,10	4506052,50	100	98,70	1,30
76_90	580598,21	4506051,53	100	98,70	1,30
76_95	580593,35	4506050,56	100	98,78	1,22
76_100	580588,46	4506049,59	100	99,00	1,00
76_105	580583,59	4506048,62	100	99,00	1,00
76_110	580578,71	4506047,65	100	98,40	1,60
76_115	580573,84	4506046,68	100	98,05	1,95
76_120	580568,96	4506045,71	100	97,82	2,18
76_125	580564,09	4506044,74	100	97,62	2,38
76_130	580559,20	4506043,77	100	97,81	2,19
76_135	580554,34	4506042,80	100	97,82	2,18
76_140	580549,45	4506041,83	100	98,12	1,88
76_145	580544,58	4506040,86	100	98,28	1,72
76_150	580539,70	4506039,89	100	98,60	1,40
76_155	580534,83	4506038,92	100	98,62	1,38
76_160	580529,95	4506037,95	100	99,02	0,98
76_165	580525,08	4506036,98	100	99,40	0,60
76_170	580520,19	4506036,01	100	99,41	0,59
76_175	580515,33	4506035,04	100	99,38	0,62
76_180	580510,44	4506034,07	100	99,19	0,81
76_185	580505,58	4506033,10	100	99,34	0,66
76_190	580500,69	4506032,13	100	99,42	0,58
76_195	580495,82	4506031,16	100	99,44	0,56
<b>76_200,98</b>	580490,00	4506030,00	100	99,21	0,79
<b>77_0</b>	580509,00	4506029,00	100	99,18	0,82
77_5	580508,07	4506033,94	100	99,20	0,80
77_10	580507,15	4506038,86	100	99,04	0,96
77_15	580506,23	4506043,80	100	98,82	1,18
77_20	580505,30	4506048,72	100	98,82	1,18
77_25	580504,38	4506053,66	100	99,16	0,84
<b>77_30</b>	580503,45	4506058,58	100	99,24	0,76
<b>78_0</b>	580478,00	4506047,00	100	99,00	1,00
78_5	580478,28	4506046,60	100	99,10	0,90
78_10	580478,57	4506046,20	100	99,00	1,00
78_15	580478,85	4506045,80	100	99,20	0,80
78_20	580479,13	4506045,40	100	99,20	0,80
78_25	580479,42	4506044,99	100	99,05	0,95
78_30	580479,70	4506044,59	100	99,17	0,83
78_35	580479,98	4506044,19	100	99,18	0,82
78_40	580480,26	4506043,79	100	99,03	0,97

78_45	580480,55	4506043,39	100	99,21	0,79
78_50	580480,83	4506042,99	100	99,19	0,81
78_55	580481,11	4506042,59	100	99,19	0,81
78_60	580481,40	4506042,19	100	99,10	0,90
78_65	580481,68	4506041,79	100	98,90	1,10
78_70	580481,96	4506041,39	100	98,95	1,05
78_75	580482,25	4506040,98	100	99,00	1,00
78_80	580482,53	4506040,58	100	99,00	1,00
78_85	580482,81	4506040,18	100	99,09	0,91
78_90	580483,10	4506039,78	100	99,38	0,62
78_95	580483,38	4506039,38	100	99,38	0,62
78_100	580483,66	4506038,98	100	99,19	0,81
78_105	580483,94	4506038,58	100	99,10	0,90
78_110	580484,23	4506038,18	100	99,20	0,80
78_115	580484,51	4506037,78	100	99,40	0,60
78_120	580484,79	4506037,38	100	99,41	0,59
78_125	580485,08	4506036,98	100	99,44	0,56
78_130	580485,36	4506036,58	100	99,40	0,60
78_135	580485,64	4506036,17	100	99,41	0,59
78_140	580485,92	4506035,77	100	99,41	0,59
78_145	580486,21	4506035,37	100	99,60	0,40
78_150	580486,49	4506034,97	100	99,50	0,50
78_155	580486,77	4506034,57	100	99,40	0,60
78_160	580487,06	4506034,17	100	99,30	0,70
78_165	580487,34	4506033,77	100	99,40	0,60
78_170	580487,62	4506033,37	100	99,38	0,62
78_175	580487,91	4506032,97	100	99,38	0,62
78_180	580488,19	4506032,57	100	99,40	0,60
78_185	580488,47	4506032,16	100	99,50	0,50
78_190	580488,76	4506031,76	100	99,40	0,60
78_195	580489,04	4506031,36	100	99,21	0,79
78_200	580489,32	4506030,96	100	99,04	0,96
78_205	580489,60	4506030,56	100	99,00	1,00
78_210	580489,89	4506030,16	100	99,00	1,00
<b>78_212</b>	580490,00	4506030,00	100	98,90	1,10
<b>79_0</b>	580652,00	4506049,00	100	98,76	1,24
79_5	580650,96	4506054,20	100	99,10	0,9
79_10	580649,92	4506059,39	100	99,10	0,9
79_15	580648,88	4506064,59	100	99,02	0,98
79_20	580647,85	4506069,77	100	99,00	1
79_25	580646,81	4506074,95	100	99,20	0,8
<b>79_28,90</b>	580646,00	4506079,00	100	99,01	0,99

**Tabela 3** – Dados referentes aos cálculos efetuados com o Surfer 11 para a realização do modelo 3D da Área 3 (A3). **x\_x** - Início do perfil / **x\_x** - Fim do perfil. \* - Número do perfil e distância percorrida. \*\* - Calculado a partir da subtração do valor do solo ao valor da superfície.

ID*	X	Y	Superfície	Substrato**	Solo (m)
<b>80_0</b>	580230,00	4505837,00	100	98,00	2,00
80_5	580225,13	4505836,18	100	98,00	2,00
80_10	580220,26	4505835,36	100	98,23	1,77
80_15	580215,39	4505834,54	100	98,46	1,54
80_20	580210,51	4505833,73	100	98,72	1,28
80_25	580205,64	4505832,91	100	98,72	1,28
80_30	580200,77	4505832,09	100	99,20	0,80
80_35	580195,90	4505831,27	100	99,40	0,60
80_40	580191,03	4505830,45	100	99,20	0,80
80_45	580186,16	4505829,63	100	99,20	0,80
80_50	580181,29	4505828,81	100	99,17	0,83
80_55	580176,41	4505827,99	100	99,17	0,83
80_60	580171,54	4505827,18	100	98,80	1,20
80_65	580166,67	4505826,36	100	98,70	1,30
80_70	580161,80	4505825,54	100	99,00	1,00
80_75	580156,93	4505824,72	100	98,40	1,60
80_80	580152,06	4505823,90	100	98,42	1,58
80_85	580147,19	4505823,08	100	98,90	1,10
80_90	580142,31	4505822,26	100	98,78	1,22
80_95	580137,44	4505821,44	100	98,60	1,40
80_100	580132,57	4505820,63	100	98,70	1,30
80_105	580127,70	4505819,81	100	98,70	1,30
80_110	580122,83	4505818,99	100	98,42	1,58
80_115	580117,96	4505818,17	100	98,50	1,50
80_120	580113,08	4505817,35	100	98,30	1,70
<b>80_122,14</b>	580111,00	4505817,00	100	98,16	1,84
<b>81_0</b>	580128,00	4505817,00	100	98,39	1,61
81_5	580127,39	4505821,89	100	98,44	1,56
81_10	580126,78	4505826,75	100	98,70	1,30
81_15	580126,17	4505831,64	100	98,54	1,46
<b>81_16,18</b>	580126,00	4505833,00	100	98,59	1,41
<b>82_0</b>	580125,00	4505828,00	100	98,79	1,21
82_5	580129,87	4505828,70	100	99,00	1,00
82_10	580134,75	4505829,39	100	98,90	1,10
82_15	580139,60	4505830,09	100	99,00	1,00
82_20	580144,48	4505830,78	100	99,06	0,94
82_25	580149,33	4505831,48	100	99,20	0,80
82_30	580154,20	4505832,17	100	99,42	0,58
82_35	580159,08	4505832,87	100	99,40	0,60
82_40	580163,93	4505833,56	100	99,52	0,48

82_45	580168,81	4505834,26	100	99,40	0,60
82_50	580173,66	4505834,95	100	99,52	0,48
82_55	580178,53	4505835,65	100	99,40	0,60
82_60	580183,41	4505836,34	100	99,60	0,40
82_65	580188,26	4505837,04	100	99,38	0,62
82_70	580193,14	4505837,73	100	99,17	0,83
82_75	580197,99	4505838,43	100	99,00	1,00
82_80	580202,86	4505839,12	100	98,95	1,05
82_85	580207,74	4505839,82	100	98,80	1,20
82_90	580212,59	4505840,51	100	98,50	1,50
82_95	580217,47	4505841,21	100	98,22	1,78
<b>82_100,94</b>	580223,00	4505842,00	100	98,00	2,00
<b>83_0</b>	580216,00	4505831,00	100	98,12	1,88
83_5	580214,86	4505836,20	100	98,15	1,85
83_10	580213,72	4505841,39	100	98,20	1,80
<b>83_15</b>	580212,58	4505846,59	100	98,30	1,70



# Anexo 8

Mapas de Isolinhas

e

Modelação 3D

# Área 1

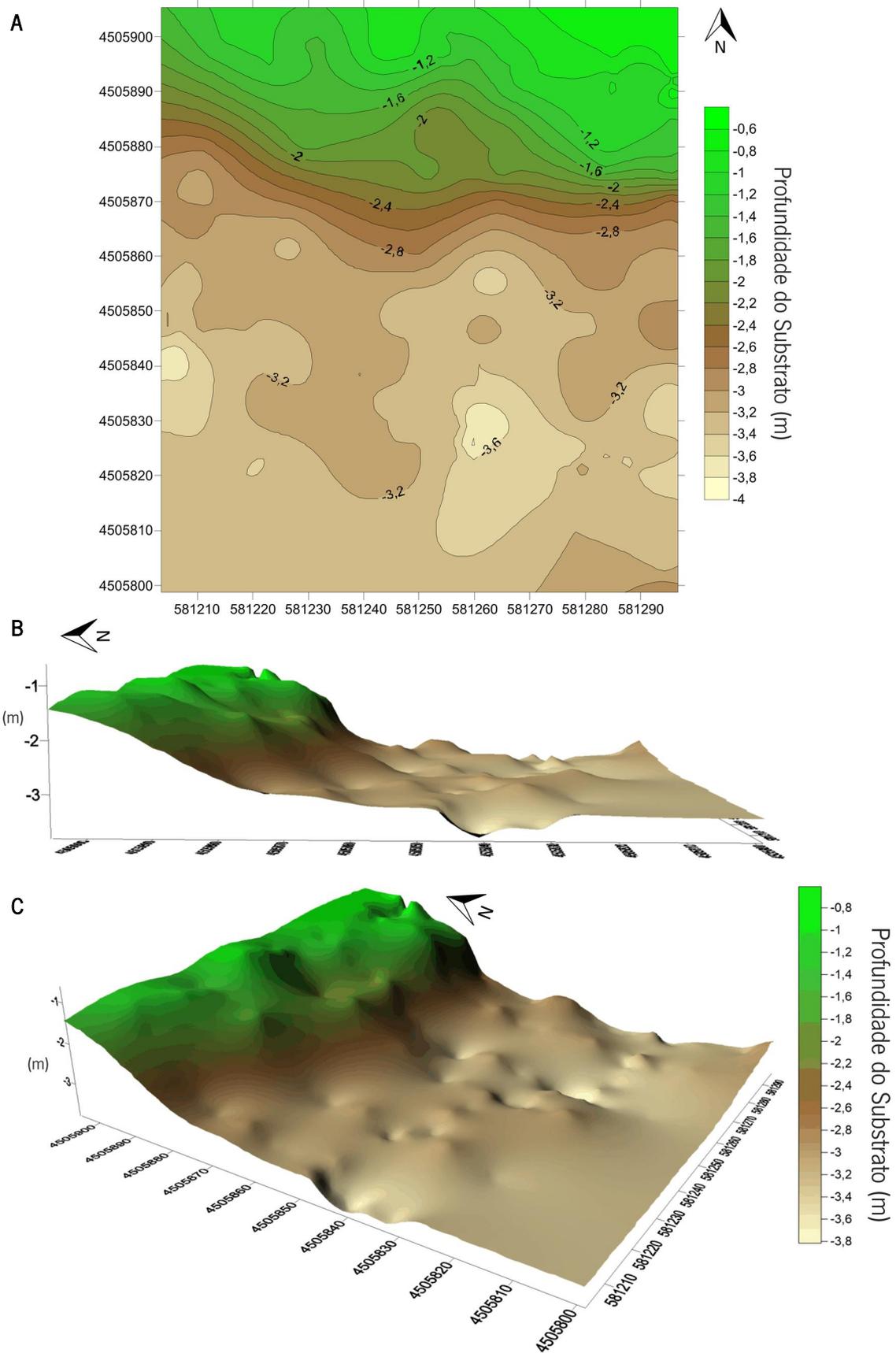


Figura 25 – A - Mapa de isolinhas correspondente à Área 1; B - Vista de perfil da Área 1; C - Vista geral da Área 1.

# Área 2

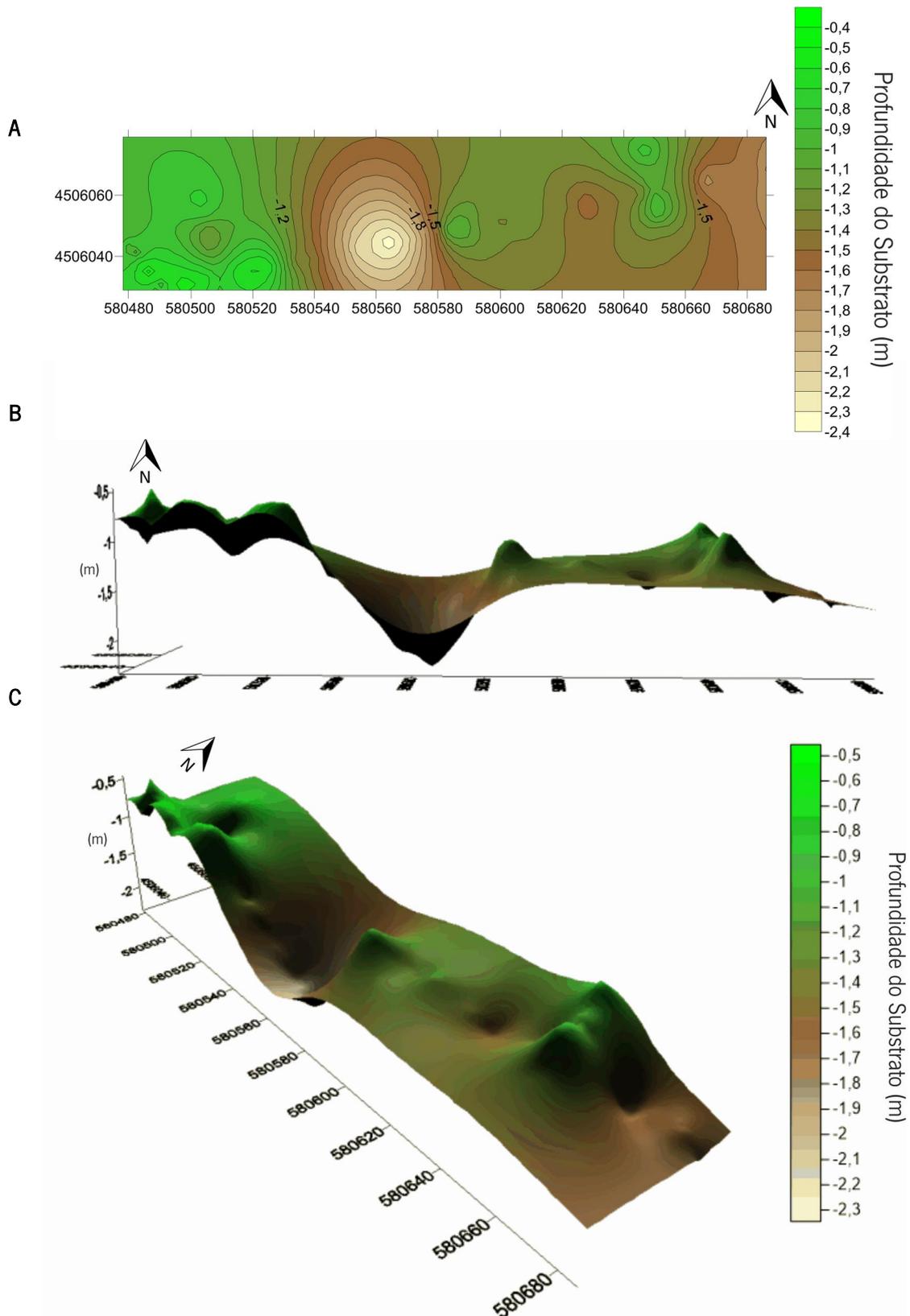


Figura 26 – A - Mapa de isolinhas correspondente à Área 2; B - Vista de perfil da Área 2; C - Vista geral da Área 2.

# Área 3

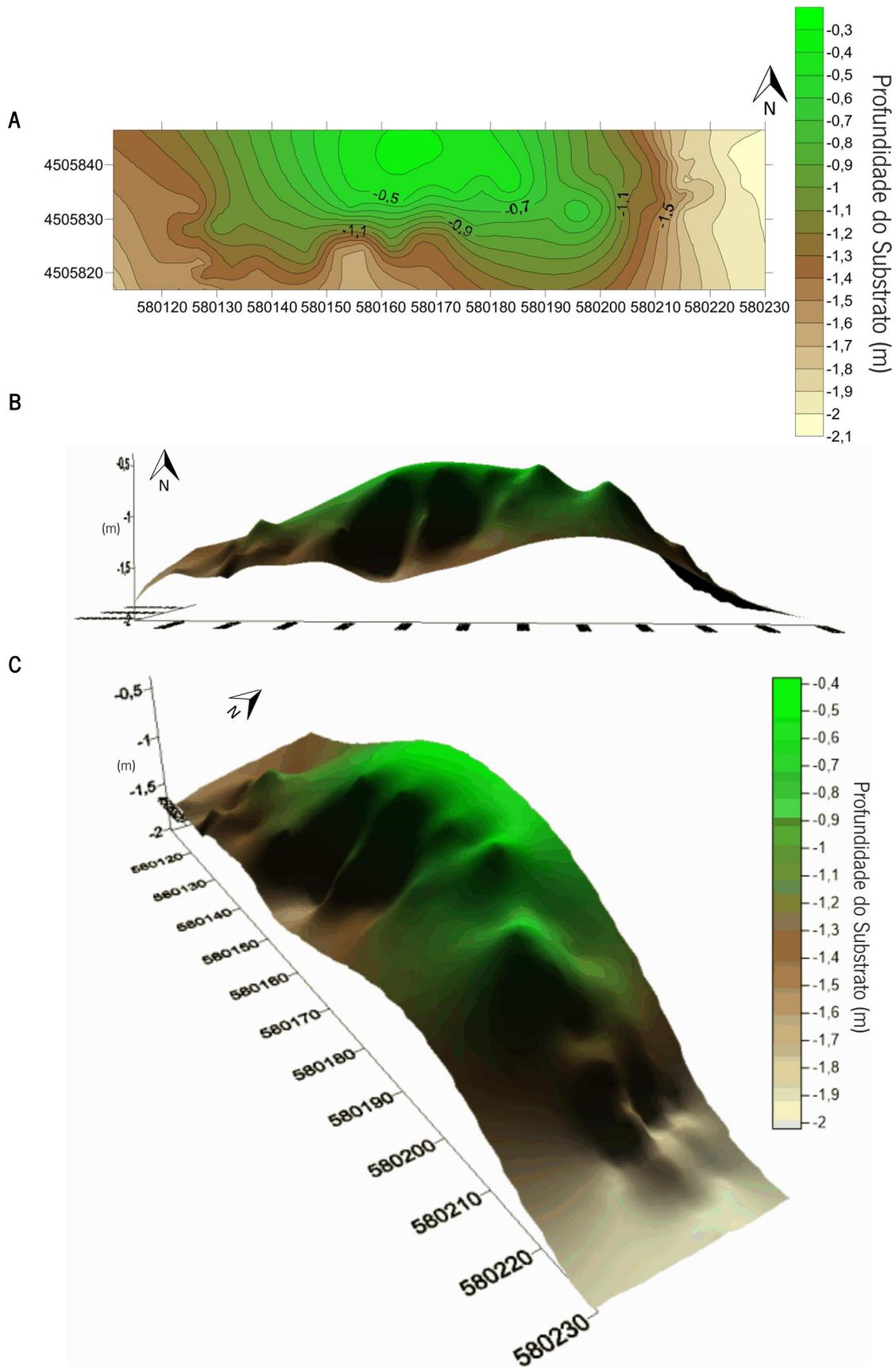


Figura 27 – A - Mapa de isolinhas correspondente à Área 3; B - Vista de perfil da Área 3; C - Vista geral da Área 3.

# Anexo 9

Cálculo da Tonelagem  
de Sólidos

Tabela 4 – Tabelas referentes às áreas estudadas (A1, A2 e A3) com o cálculo do peso, em toneladas, dos sólidos (a vermelho) e do peso total (a verde).

## Área 1

Porosidade*	15%
Índice de Saturação**	20%
Densidade	2

	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Peso (t)
Volume Total (Vt)	26600,05	753,23	753229000	-	-	-
Volume de Vazios (Vv=Vt*n%*)	3990,01	112,98	112984000	-	-	-
Volume de Sólidos (Vs=Vt-Vv)	22610,04	640,25	640245000	2	1280490000	<b>1280,49</b>
Volume de Água (Va=W*n%**)	798,00	22,60	22597000	1	22597000	22,60
<b>Peso Total</b>						<b>1303,09</b>

## Área 2

Porosidade*	15%
Índice de Saturação**	20%
Densidade	2

	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Peso (t)
Volume Total (Vt)	13787,19	390,41	390414000	-	-	-
Volume de Vazios (Vv=Vt*n%*)	2068,08	58,56	58562000	-	-	-
Volume de Sólidos (Vs=Vt-Vv)	11719,11	331,85	331848000	2	663696000	<b>663,70</b>
Volume de Água (Va=W*n%**)	413,62	11,71	11712000	1	11712000	11,71
<b>Peso Total</b>						<b>675,41</b>

## Área 3

Porosidade*	15%
Índice de Saturação**	20%
Densidade	2

	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Peso (t)
Volume Total (Vt)	4085,16	115,68	115679000	-	-	-
Volume de Vazios (Vv=Vt*n%*)	612,77	17,35	17352000	-	-	-
Volume de Sólidos (Vs=Vt-Vv)	3472,38	98,33	98327000	2	196654000	<b>196,65</b>
Volume de Água (Va=W*n%**)	122,56	3,47	3470000	1	3470000	3,47
<b>Peso Total</b>						<b>200,12</b>

Unidades de Conversão	1 ft <sup>3</sup> = 0,0283168 m <sup>3</sup>
	1 m <sup>3</sup> = 1.000.000 cm <sup>3</sup>
	1 t = 10 <sup>6</sup> g = 1000 Kg